

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-фізичний факультет**

**Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК 621.07.9:539.219.3

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 132 Матеріалознавство**

**на тему: «Створення зносостійких покриттів на сталі ХВГ  
електроіскровим легуванням Cr-, Al-, C- анодами»**

Виконав:

студент II курсу, групи ФМ-81мп

Крайник Владислав Володимирович \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доцент Іващенко Є.В. \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

д.т.н., професор Левченко О.Г. \_\_\_\_\_

Консультант з організаційно-економічної частини:

к.е.н., доцент Петренко К.В. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доцент Лоскутова Т.В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Інженерно-фізичний факультет**

**Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_»\_\_\_\_\_2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Крайнику Владиславу Володимировичу**

1. Тема дисертації «Створення зносостійких покриттів на сталі ХВГ електроіскровим легуванням Cr-, Al-, C- анодами», науковий керівник дисертації Іващенко Євген Вадимович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «12» листопада 2019 р. № 3890-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження – процес формування структури та складу поверхневих шарів на сталі ХВГ при ЕІЛ хромовим, алюмінієвим та вуглецевим анодами без захисного середовища.

4. Вихідні дані: літературні дані та дані переддипломної практики.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) опрацювати фахові публікації за темою дослідження;
- 2) визначити комплекс методик для проведення дослідження;
- 3) підготувати установку для проведення ЕІЛ;
- 3) провести процеси електроіскрового легування;
- 4) дослідити вплив ЕІЛ на структуру та властивості утворених покриттів;
- 5) провести аналіз результатів та зробити висновки по роботі.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1) Лобачова Г.Г., Іващенко Є.В., **Крайник В.В. (гр. ФМ-81мп)**. Структура та властивості сталі Х12МФ після електроіскрового легування хромом та титаном // Збірка тез доповідей XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», 18 – 19 квітня 2019 р., Київ, Україна. – С. 80 - 82.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	д.т.н., професор Левченко О.Г.		
Організаційно-економічна частини	к.е.н., доцент Петренко К.В.		
3 питань нормоконтролю	ас. Шаповалова Н.А.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Видача завдання		
2	Огляд сучасних наукових робіт та написання літературного огляду		
3	Освоєння методик дослідження		
4	Виконання експериментальних досліджень		
5	Отримання результатів та їх обговорення		
6	Написання висновку та переліку посилань		
7	Оформлення роботи		
8	Оформлення презентації та написання доповіді		
9	Попередній захист		
10	Захист на засіданні ЕК		

Студент

В.В. Крайник

Науковий керівник дисертації

Є.В. Іващенко

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 91 сторінки, 30 рисунків, 21 таблиці, 55 посилань на літературні дані.

### ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ (ЕІЛ), КАТОД, АНОД, НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ, ХРОМ, АЛЮМІНІЙ, ВУГЛЕЦЬ

Об'єкт дослідження: поверхневі шари сталі ХВГ після трьохстадійного електроіскрового легування (ЕІЛ) хромом, вуглецем та алюмінієм.

Мета роботи: дослідження структури, кінетики формування та мікротвердості поверхневих шарів сталі ХВГ після послідовного нанесення хрому, вуглецю та алюмінію методом електроіскрового легування.

Проведено аналіз новітніх літературних джерел за темою роботи. Зроблено висновки та обґрунтовані переваги методу електроіскрового легування.

Під час виконання роботи були створені електроіскрові покриття на сталі ХВГ шляхом почергового нанесення хрому, вуглецю та алюмінію у різній послідовності. Проведені гравіметричний, мікроструктурний, мікродюрометричний, та рентгеноструктурний аналізи, випробування на зносостійкість поверхневих шарів сталі ХВГ в процесі та після ЕІЛ.

Використані схеми нанесення покриттів у послідовності Al – Cr – C, Al – C – Cr, C – Cr – Al, C – Al – Cr, Cr – C – Al, Cr – Al – C. Схеми обробки з початковою стадією легуванням хромом дозволяють отримати на сталевій поверхні шар товщиною (15–20) мкм та мікротвердістю (13,56–14,08) ГПа.

Під час проведення випробування на зносостійкість було встановлено, що зразок із сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Cr – Al – C є у 3,6 разів стійкіший до стирання, аніж у зразка із сталі ХВГ без ЕІЛ.

## ABSTRACT

Master's dissertation: 91 pages, 30 figures, 21 tables, 55 references to literary data.

ELECTRIC-SPARK ALLOYING (ESA), CATHODE, ANODE, COATINGS, CHROME, ALUMINUM, CARBON

Object of study: surface layers of HVG steel after three-stage electro-spark alloying (ESA) with chromium, carbon and aluminum.

Purpose: to study the structure, kinetics of formation and microhardness of surface layers of HVG steel after successive application of chromium, carbon and aluminum by electro-spark alloying.

The analysis of the latest literary sources on the topic of work. The conclusions and substantiated advantages of the method of spark ignition are made.

During the work, electro-spark coatings on HVG steel were created by alternately applying chromium, carbon and aluminum in different sequences. Gravimetric, microstructural, microdurometric, wear-resistance and X-ray diffraction analysis of surface layers of HVG steel during and after ESA was performed.

Used coating schemes in the sequence Al - Cr - C, Al - C - Cr, C - Cr - Al, C - Al - Cr, Cr - C - Al, Cr - Al - C. Schemes of treatment with the initial stage of chromium doping allow obtain on the steel surface a layer of thickness (15-20) microns and microhardness (13.56–14.08) GPa.

During the wear test, it was found that a sample of HVG after ESA according to the Cr - Al - C doping plan is 3.6 times more resistant to abrasion than to a sample of HVG without ESA.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....</b>	<b>11</b>
1.1 Фізика процесу електроіскрового легування .....	11
1.2 Модельні уявлення про процес електроіскрового легування.....	13
1.3 Вплив міжелектродного середовища на процес ЕІЛ.....	16
1.4 Створення багатокомпонентних шарів шляхом пошарового електроіскрового легування .....	17
1.5 Висновки до розділу 1 .....	19
<b>2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>20</b>
2.1 Вихідні матеріали.....	20
2.2 Методика експерименту .....	21
2.3 Методика дослідження .....	23
2.3.1 Гравіметричний метод.....	23
2.3.2 Мікроструктурний аналіз .....	26
2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз.....	27
2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз .....	29
2.3.5 Випробування на зносостійкість .....	31
2.4 Висновки до розділу 2 .....	32
<b>3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....</b>	<b>33</b>
3.1 Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення хрому .....	33
3.2 Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення алюмінію .....	41
3.3. Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення вуглецю .....	45
3.4 Порівняльна характеристика покриттів.....	50
3.5 Висновки до розділу 3 .....	52
<b>4 РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ.....</b>	<b>54</b>
4.1 Актуальність .....	54

4.2	Опис ідеї проекту .....	54
4.3	Розрахунок собівартості проведення дослідження .....	55
4.3.1	Витрати на основні матеріали.....	55
4.3.2	Витрати на спеціальне обладнання та прилади .....	56
4.3.3	Зарплата виконавців по темі, основна та додаткова .....	56
4.3.4	Відрахування на соціальні заходи.....	58
4.3.5	Витрати на службові відрядження .....	58
4.3.6	Витрати на послуги сторонніх організацій .....	58
4.3.7	Інші прямі невраховані витрати .....	58
4.3.8	Накладні витрати.....	58
4.3.9	Планова кошторисна вартість дослідження.....	59
4.4	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	60
4.5	Розроблення ринкової стратегії проекту .....	66
4.6	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	67
4.7	Формування системи збуту .....	68
4.8	Висновки до розділу 4 .....	68
<b>5</b>	<b>ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>	<b>69</b>
5.1	Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві.....	69
5.2	Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів .....	71
5.2.1	Мікроклімат .....	71
5.2.2	Освітленість .....	73
5.2.3	Шум .....	73
5.2.4	Електробезпека.....	75
5.2.5	Запиленість та загазованість .....	77
5.3	Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці .....	78
5.3.1	Розрахунок вентиляції .....	78
5.4	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях .....	79
5.4.1	Пожежна безпека.....	79
5.4.2	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	82
5.5	Висновки до розділу 5 .....	82

<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>84</b>
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>85</b>
<b>СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>86</b>



## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

**ЕІЛ** – електроіскрове легування;

**НДР** – науково-дослідницька робота;

**ХТО** – хіміко-термічна обробка;

**ДБН** – Державні будівельні норми;

**ДСН** – Державні санітарні норми;

**ДСтУ** – Державний стандарт України;

**ПЕОМ** – персональна обчислювальна машина;

**РЕА** – радіоелектронна апаратура.

## ВСТУП

На практиці часто виникає необхідність підвищити зносостійкість, твердість, корозійну стійкість металевих поверхонь деталей, відновити зношену деталь, заміна спеціальних сталей менш дефіцитними або більш дешевими з мінімальними витратами та з максимальною схожістю властивостей, збільшення довговічності та часу роботи деталі. Існують різні способи та методи, щоб позбутися всіх цих проблем. До них відносяться: поверхнева термічна обробка, легування поверхні деталі наплавлення сплавів, що відповідають необхідним вимогам, гальванічне нанесення на поверхню деталі антикорозійного покриття та інші [1].

Як свідчать літературні дані, для зміцнення та нанесення захисних поверхонь вигідно використовувати електрофізичні методи обробки матеріалів, сутність яких полягає на використанні концентрованих потоків енергії.

Однією з актуальних технологій, що можуть вирішити ці всі проблеми є електроіскрове легування (ЕІЛ).

Багатьма дослідниками доведена ефективність застосування ЕІЛ для локального зміцнення деталей машин та інструменту, що дозволяє значною мірою поліпшити експлуатаційні характеристики, відновити ушкоджені ділянки робочих поверхонь та подовжити строк їх придатності.

Його основними перевагами є широкий спектр можливих варіантів проведення експерименту в залежності від обраних матеріалів та відповідно отриманих властивостей поверхні, а також економічність, екологічність та простота відтворення [2].

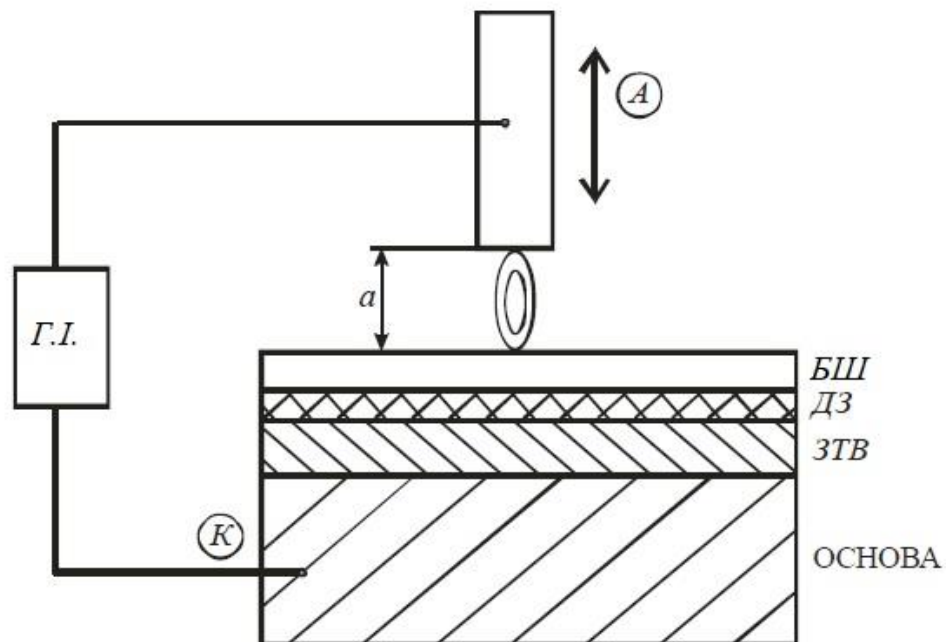
Аналіз літератури свідчить про недостатню кількість джерел, що присвячені вивченню структури, фазового складу і властивостей поверхневих шарів сталей після ЕІЛ перехідними металами, тому дослідження даного процесу є актуальним завданням та потребує подальшого вивчення.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Фізика процесу електроіскрового легування

Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) відомий більше 60 років. Даний метод, розроблений Б.Р. Лазаренко і Н.І. Лазаренко, заснований на явищі електричної ерозії матеріалів при іскровому розряді в газовому середовищі (переважно на повітрі), полярного перенесення продуктів ерозії на катод (деталь), на поверхні якого формується шар зміненої структури і складу. Величина цих змін визначається складом, структурою, властивостями матеріалів електродів і технологічними параметрами процесу ЕІЛ [3].

Формування зміцненого шару відбувається в результаті складних плазмохімічних, теплофізичних і механотермічних процесів, що реалізуються на локальних ділянках впливу одиничного імпульсу іскрового розряду, і в загальному випадку протікають за наступною схемою (рис. 1.1) [4].



А – легувальний електрод (анод); К – поверхня деталі (катод);  
 а – міжелектродний простір; Г. І. – генератор імпульсів; БШ – білий шар;  
 ЗТВ – зона термічного впливу

Рисунок 1.1 – Загальна схема процесу електроіскрового легування [4]

При зближенні легувального електрода з поверхнею деталі на певній відстані відбувається іскровий розряд тривалістю ( $10^{-6} - 10^{-3}$ ) с. В результаті на поверхнях анода і катода утворюються локальні осередки плавлення і випаровування, що викликають їх електричну ерозію і взаємний масоперенос [4].

Завдяки полярному ефекту, пов'язаного з переважним перенесенням матеріалу анода на катод, на поверхні останнього формується тонке покриття з певними фізико-хімічними і механічними властивостями. Паралельно відбувається імпульсно термічний вплив, що викликає гамму механотермічних процесів, що призводять до пластичної деформації і крихкого руйнування поверхневих шарів електродів [4-5].

Оскільки електроди, при іскровому розряді, знаходяться у кінематичному зв'язку, слідом за осадженими частинками, зміцнююча поверхня піддається ударно-вібраційному впливу. Протягом кожного акту контактної взаємодії між електродами утворюються і тут же руйнуються мікролокальні точки зварювання, що викликають, додаткову до механічного впливу, пластичну деформацію поверхневих шарів. Енергетичний вплив стимулює перебіг, супутніх електроіскровому легуванню, термохімічних, газодинамічних і дифузійних процесів.

Зміцнена поверхня, сформована електроіскровим легуванням, представляє нову композиційну структуру, яку можна уявити у такому вигляді. Верхній шар становить плівку з матеріалу анода, модифікованого елементами матеріалу катода і міжелектродного середовища, що лежать на поверхні у вигляді окремих «острівців», суцільність яких залежить від режимів зміцнення, матеріалу анода і часу обробки. Під ним розташовується зона, що складається з суміші матеріалів анода і катода, утворена в результаті конденсації іонно-плазмової і крапельної фази на поверхні деталі («білий» шар) [5].

Далі йде шар, сформований за рахунок дифузії хімічних елементів матеріалу анода в зміцненому матеріалі катода (дифузійна зона). І, нарешті,

під ним розташовується найнижчий і найбільший по товщині шар, утворений в результаті імпульсного теплового впливу (зона термічного впливу). З переміщенням вглиб дана структура переходить в структуру основного матеріалу. Залежно від режимів електроіскрового легування значимість перших трьох шарів може бути істотною або незначною, а роль структури, сформованої під дією імпульсного теплового впливу, є завжди основоположною, що визначає ефективність зміцнення [6].

Зміцнення відбувається за рахунок наступних процесів:

- за рахунок осадження на поверхні катода матеріалу протилежної електрода (анода). Найбільший ефект – при використанні матеріалу легуючого електрода з високою твердістю;
- за рахунок дифузії матеріалу анода в катод і освіти розчинів, сумішей, хімічних сполук. Відбувається насичення поверхні оксидами, нітридами, а також утворення на поверхні метастабільних фаз з дуже дрібним зерном;
- за рахунок утворення зони взаємної кристалізації і нерівноважних структур, фаз, а також дрібнозернистої структури.

При формуванні фазового складу і структури матеріалів і покриттів при ЕІЛ протікають такі фізико-хімічні процеси, як дифузія, фазові перетворення, масоперенос, гетерогенні хімічні реакції, пружна і пластична деформація [6].

## **1.2 Модельні уявлення про процес електроіскрового легування**

Єдиної моделі процесу електроіскрового легування, яка дозволяла б описати явища, що відбуваються за час одного циклу обробки, в даний час не існує. Найбільш повна модель процесу електроіскрового легування викладена в роботах основоположників методу. Суть даної моделі полягає в тому, що при зближенні електродів напруженість «електричного поля» збільшується і при деякому проміжку між ними вона досягає величини достатньої для виникнення іскрового електричного розряду. Через канал, що виникає, наскрізної провідності, пучок електронів фокусовано вдаряється об тверду

металеву поверхню анода. Кінетична енергія загальмованих електронів виділяється в поверхневих шарах анода. У зв'язку з тим, що система різко звільняє накопичену енергію, щільність струму значно перевершує критичні значення. В результаті цього від анода відокремлюється крапля розплавленого металу, яка рухається до катода, випереджаючи рухомий анод [7].

При переміщенні в міжелектродному просторі, крапля встигає нагріватись до високої температури, закипіти і «вибухнути». Ланцюг струму переривається, зусилля електромагнітного поля зникають і частки розлітаються широким фронтом. Так як перегріта крапля і частки перебували в контакті з міжелектродним середовищем, то за складом і властивостями вони відрізняються від вихідного матеріалу легуючого електрода - анода. Розплавлені частинки, досягши поверхні - катода, зварюються з ним і частково впроваджуються в поверхню. Процес на цьому не закінчується, оскільки слідом за частинками рухається електрод, включений в систему, яка вже встигла знову накопити енергію. Через розпечені частинки, що лежать на катоді, відбувається другий імпульс струму, що супроводжується механічним ударом [7].

На наступному етапі процесу при механічному контакті електродів частки зварюються між собою, прогрівається тонкий шар поверхні катода, на якому вони розташовані. При цьому крім дифузії перенесених частинок в товщину катода, під дією електричного струму відбуваються хімічні реакції між цими частками і матеріалом катода. Механічний удар по розпеченій масі матеріалів проковує отримане покриття, чим значно збільшує його однорідність і щільність. Далі анод рухається вгору, а на поверхні катода залишається міцно з'єднаний з ним шар матеріалу анода [7].

З наведеної моделі процесу електроіскрового зміцнення випливає, що перенесення матеріалу анода відбувається з моменту пробією міжелектродного проміжку до зіткнення його з поверхнею катода; з моменту пробією і до зіткнення електродів відбуваються два імпульсу струму і речовина переноситься в крапельному стані [7].

Вказується на недоліки даної моделі, які полягають в тому, що в ній не розглядаються процеси, що відбуваються при розбіжності електродів. Як показали дослідження, при електроіскровий обробці в продуктах ерозії виявляються частинки, що утворилися з рідкої і парової фаз, а також частки, отримані в результаті крихкого руйнування матеріалу анода.

У моделі основоположників не розглянутий питання про вплив міжелектродного середовища на процес перенесення і ерозії речовини анода, а також про структуру і фазовий стані зміненої поверхневого шару [7].

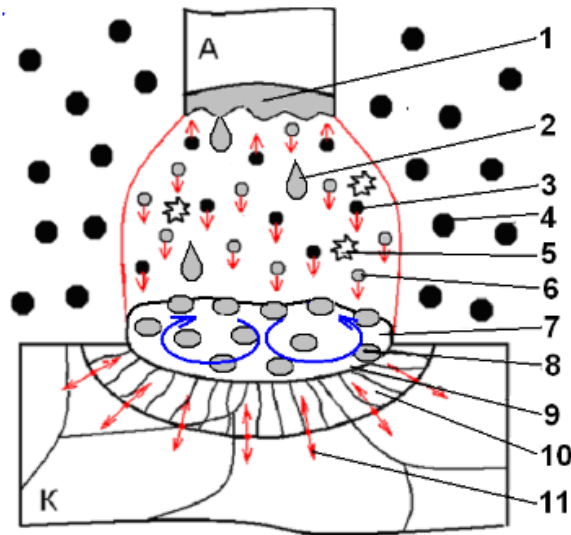
За результатами літературного огляду, було знайдено новий принцип трактування даного процесу. Ця модель пояснює те, що при зближенні електродів зростає напруженість електричного поля та виникає іскровий, під дією якого розігріваються з високою швидкістю ( $10^7 - 10^{11}$ ) К/с локальні ділянки на аноді та катоді. Відбувається розплавлення, випаровування та викид матеріалу у рідкому та пароподібному стані з локальних ділянок поверхні легувального електроду з великою швидкістю (рис. 1.2) [8].

Матеріал аноду у пароподібному, рідкому або твердому (частинки крихкого руйнування під дією термічних напружень) стані переносяться у розплавлену мікрованну катоду та переміщується. Співвідношення частинок руйнування різного агрегатного стану залежить від елементу аноду [8].

Водночас відбувається іонізація та розкладання молекул газового середовища з утворенням атомарного вуглецю (азоту), який насичує розплавлені об'єми обох електродів [8].

Короткотривала дія іскрового розряду ( $10^{-5}$  с) не дає змоги відбутися вирівнюванню концентрації в межах розплавленої області на катоді, через що в ній формуються локальні ділянки з різною концентрацією атомів елементів аноду, катоду та насичувального середовища (азоту або вуглецю) [8].

Ділянки легованого шару, що різняться хімічним складом, мають різні коефіцієнти термічного розширення [8].



А - анод; К – катод; 1 – зона розплавленого металу аноду (Me);  
 2 – мікрооб'єм розплавленого Me; 3 – атом С (N); 4 – молекула газу міжелектродного середовища; 5 – частинки крихкого руйнування аноду;  
 6 – атом Me; 7 – розчин Fe-Me- С (N); 8 – області, збагачені Me; 9 – зона розплавлення та перемішування; 10 – зона термічного впливу; 11 – термічні напруження

Рисунок 1.2 – Схема процесу ЕІЛ сплавів Fe у насичувальному середовищі з елементами втілення [8]

Внаслідок цього після припинення дії іскрового імпульсу та надшвидкому охолодженні ( $\approx 10^6$  K/c) виникають високі термічні напруження, які додаються до структурних, зумовлених високими градієнтами температури. Результатом такої багаторазової взаємодії при постійному переміщенні аноду по поверхні зразка є формування легованого шару, який складається з локально неоднорідних областей, що розрізняються густиною дислокацій та кількістю виділених на них дисперсних частинок фаз втілення [8].

### 1.3 Вплив міжелектродного середовища на процес ЕІЛ

Газове міжелектродне середовище в процесах електроіскрової обробки традиційно використовувалося як охолоджуючий і захисний компонент.



Однак якістю процесу можна активно управляти цілеспрямованим підбором міжелектродного середовища, про що свідчать дослідження останніх років в цій галузі. При розчиненні кисню, вуглецю, азоту, аргону в перехідних металах, утворюються тверді розчини впровадження або неметалеві сполуки по межах зерен, що підвищує поріг холодноламкості металу і сприяє крихкому руйнуванню під дією циклічних навантажень від іскрових розрядів. Виникнення оксидних, нітридних та карбідних фаз на поверхні електродів перешкоджає схоплюванню, тим самим поліпшуються умови формування легованого шару на деталі. Це справедливо по відношенню до електродів з тугоплавких сполук і сплавів на їх основі, для яких можлива взаємодія з елементами міжелектродного середовища [9-11].

Варіюючи складом міжелектродного середовища, можна не тільки міняти хід ерозійного процесу, а й створювати поверхневі структури заданої властивості. Газові середовища принципово не змінюють характер масопереносу. Склад міжелектродного середовища змінює стан робочої поверхні легувального електрода в процесі ЕІЛ. На поверхні, після ЕІЛ заліза металами на повітрі, присутні також оксидні і нітридні фази цього металу, що виникають при його взаємодії з елементами навколишнього середовища в процесі обробки. Кількість оксидних і нітридних фаз, що сприяють окрихчуванню поверхні електрода [12-15].

#### **1.4 Створення багатокомпонентних шарів шляхом пошарового електроіскрового легування**

При аналізі публікацій, пов'язаних з ЕІЛ, було виявлено що всі дослідження виконуються в основному для моношарових покриттів (легування одним матеріалом). Основними прийомами, використовуваними в отриманні багатошарових покриттів із застосуванням методу ЕІЛ є:

- нанесення багатошарових покриттів тільки методом ЕІЛ;
- нанесення комбінованих покриттів.

У першому випадку, нанесення багат шарових покриттів пов'язано в основному із зміцненням. Нанесення другого шару призначається для зниження шорсткості, поліпшення тепловідводу, підвищення жаростійкості, поліпшення фрикційних властивостей.

У другому випадку для отримання багат шарових покриттів ефективною представляється комбінована обробка, заснована на поєднанні ЕІЛ з різними методами нанесення покриттів, такими як: хіміко-термічна обробка (ХТО), гальванічні покриття, покриття нанесені газоплазмовим і плазмовим методами, іонно-плазмовим напиленням, лазерною обробкою [16-19].

В якості аноду для ЕІЛ вибирають сплави або матеріали, що можуть підвищити потрібні характеристики певної деталі (жаростійкість, зносостійкість, твердість, ударну в'язкість та ін.).

Часто при виборі анодного матеріалу звертають увагу на розчинність з матеріалом основи. Бажаною є необмежена розчинність елементів в твердому стані.

Було виявлено, що пошарове ЕІЛ призводить до виникнення поверхневих легованих шарів підвищеної мікротвердості (7-10) ГПа. Електроіскрове легування сильними карбідоутворювальними елементами у вуглецевому насичувальному середовищі дає змогу створювати леговані шари з високими триботехнічними характеристиками за рахунок дрібнодисперсних твердих карбідних, нітридних частинок, що виділилися в твердих розчинах необмеженої розчинності [20-22].

Спосіб пошарового нанесення на металеву поверхню (за умови дотримання відпрацьованих технологічних параметрів) електроіскрових покриттів з металів Cu, In, Pb, Cd та Sn і покриттів з Ti, V і W, а також їх карбідів і твердих сплавів типу ВК підвищує (у порівнянні з покриттям без підшару) якість формованого поверхневого шару: в ньому одночасно досягається достатня твердість, зменшуються шорсткість і пористість, збільшується суцільність.

На сталевих підкладках багатошарові покриття мають мікротвердість поверхневого шару в діапазоні (6,42–8,74) ГПа, яка плавно зменшується в міру поглиблення, досягаючи твердості основного металу [23-24].

У разі пошарового легування в послідовності Ti–Cr–Ti–Cr за високих температур утворюються необмежені розчини Ti та Cr, що сприяє адгезійній міцності легованого шару. Почергове нанесення цих елементів призводить до виникнення в легованій зоні ділянок Ti, збагачених Cr, та ділянок Cr, збагачених Ti. Оскільки в процесі ЕІЛ відбувається насичення поверхневих шарів вуглецем, то можна припустити, що поєднання сильного карбідоутворювального елемента (Ti) та менш схильного до утворення карбідів елемента (Cr) зумовлює формування поверхневої легованої зони, крихкість якої буде невисокою [25-28].

### **1.5 Висновки до розділу 1**

1. З'ясовано, що допомогою ЕІЛ можна підвищити твердість локальних ділянок металевих поверхонь, що дозволяє значною мірою поліпшити експлуатаційні характеристики, відновити ушкоджені ділянки робочих поверхонь та подовжити строк їх експлуатації.

2. На основі проаналізованих літературних даних можна зробити висновок про перспективність та ефективність ЕІЛ для створення зміцнених поверхонь широкого спектру функціонального призначення.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Вихідні матеріали

У ролі досліджуваного матеріалу було обрано сталь ХВГ. В якості електродних матеріалів були використані аноди, що виготовлені з чистих матеріалів: хром, алюміній та вуглець. Хімічний склад даної сталі та анодів наведені у таблиці 2.1 [29].

Таблиця 2.1 – Хімічний склад вихідних матеріалів для дослідження [29]

Матеріал	Використання у дослідженні	Хімічний склад, мас.%
Сталь ХВГ	Катод	C – 0,9..1,05; Si – 0,1..0,4; Mn – 0,8..1,1; Ni – до 0,35; S – до 0,03; P – до 0,03; Cr – 0,9..1,2; Mo – до 0,3; W – 1,2..1,6; Cu – до 0,3; Fe ~ 94
Cr	Анод	Cr – 99,9
Al	Анод	Al – 99,9
C	Анод	C – 99,9

Заевтектоїдна інструментальна сталь ХВГ має високу зносостійкість, міцність, корозійну стійкість, здатність витримувати теплові навантаження та відсутність деформацій при загартуванні. Переважно сталь ХВГ використовують для виготовлення вимірювального і ріжучого інструменту, різьбових калібрів, протяжок, мітчиків, розгорток, матриць та пуансонів, технологічного оснащення [30].

Для експериментів використовувались зразки розміром 10мм×10мм×5мм, що були вирізані на токарному станку із прутка сталі квадратного січення.

Хромовий, алюмінієвий та вуглецевий аноди були обрані для того, щоб покращити властивості поверхневого шару сталі ХВГ, таких як, твердість, зносостійкість та корозійну стійкість.

Хром використовується для підвищення зносостійкості, твердості та корозійної стійкості, покращує стійкість ріжучого інструменту. При підвищенні вмісту хрому в сталі до 1,5 % також підвищує ударну в'язкість та знижує поріг холодноламкості. При малому вмісті карбідоутворюючого елементу хром, що розчиняється в цементиті, заміщує у ньому атоми заліза, до 20 %. У феритах, що містять хром, після швидкого охолодження, набувають голкоподібну структуру і більш високу твердість. Це пов'язано з фазовим наклепом в результаті  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -перетворення, що проходить із зміною об'єму [31].

Алюміній збільшує міцність, жаростійкість і окалиностійкість, корозійну стійкість, зменшує щільність і схильність до водневої крихкості. При вмісті алюмінію в сталі 0,02 % - 0,7 % сповільнюється процес старіння.

При вмісті у сталі 0,38 % вуглецю цементит становить 5 %, при 0,7 % вуглецю – 10 % та при 2 % вуглецю досягає 30 %. Це призводить, що тверді і крихкі частинки цементиту, які спотворюють кристалічну ґратку ферита, ускладнюють рух дислокацій, а отже, підвищують опір до деформації і зменшують пластичність та в'язкість. Внаслідок цього із збільшенням в сталі вуглецю зростає твердість, межа міцності і текучості, зменшується відносне видовження та ударна в'язкість. Це пояснюється виділенням по границям колишнього зерна аустеніту вторинного цементиту, що утворює суцільний каркас при вмісті в сталі вуглецю більше 1,2 % - 1.3 %. Підвищення вмісту вуглецю полегшує перехід сталі у холодноламкий стан. Кожні 0,1 % вуглецю підвищують температуру порогу холодноламкості у середньому на 20 °С і розширює перехідний інтервал від в'язкого до крихкого стану [32-33].

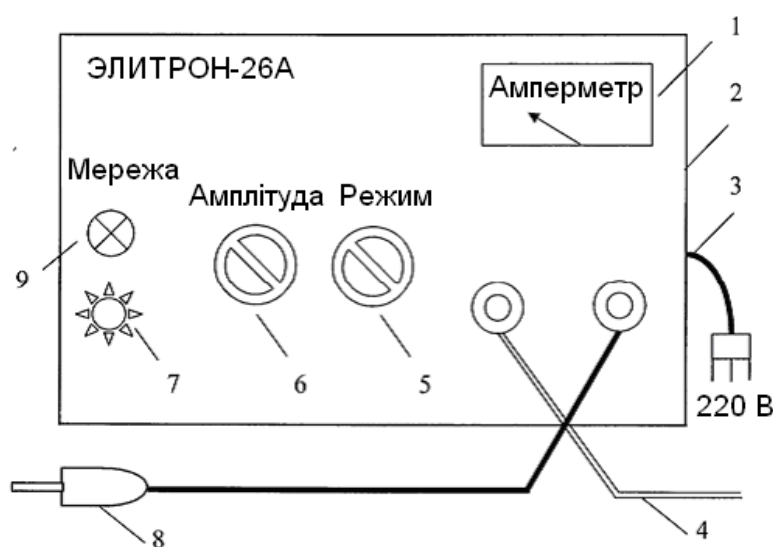
Із збільшенням в сталі вуглецю підвищується щільність і знижує теплопровідність.

## 2.2 Методика експерименту

Для досягнення мети дослідження було проведено ЕІЛ двох зразків за схемами:

- Cr – Al – C;
- Cr – C – Al;
- Al – Cr – C;
- Al – C – Cr;
- C – Al – Cr;
- C – Cr – Al.

Електроіскрове легування проводилося на установці «Элитрон-26А». На рис. 2.1 зображена панель керування даною установкою.

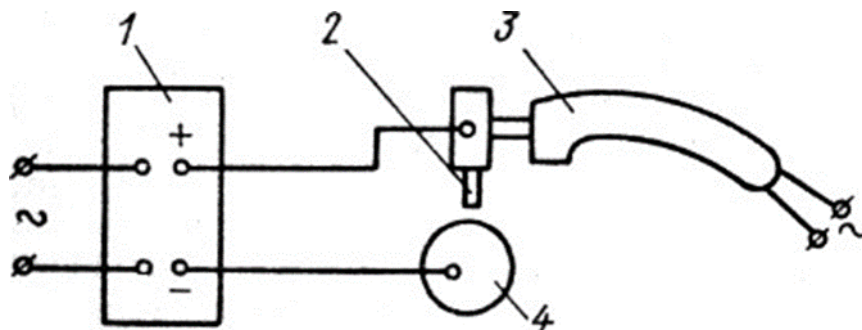


1 – амперметр; 2 – генератор; 3 – кабель живлення; 4 – з'єднувальний кабель (на плиту); 5 – тумблер ступінчастого регулювання режиму; 6 – тумблер регулювання амплітуди коливання аноду; 7 – вмикач живлення установки; 8 – віброзбуджувач (на анод); 9 – сигнальна лампочка

Рисунок 2.1 – Установка “Элитрон-26А” [34]

Живлення установки дає мережа 220 В. Тумблером 5 здійснюється корегування струму, що показує амперметр 1, у діапазоні від 0,1 А до 3 А, режимами від 1 до 10. Для обох зразків режим становить 2 А і процес відбувається на повітрі при кімнатній температурі. Кожний етап нанесення аноду займає по 3 хвилини.

Схема проведення ЕІЛ зображена на рис. 2.2. Зразок (4) надійно закріплюється тримачем, а електромагнітний віброелемент (3) переміщують (вручну) над його поверхнею.



1 – генератор імпульсів; 2 – легуючий електрод; 3 – електромагнітний віброелемент; 4 – зразок (катод)

Рисунок 2.2 – Схема установки для ЕІЛ [34]

Основні електродні пари (катод – анод) підбиралися з урахуванням того, що у процесі ЕІЛ матеріали анодів (перехідних металів), взаємодіючих з матеріалом основи (сталь ХВГ), можуть утворювати різні типи твердих розчинів необмеженої (Fe – Cr) розчинності, інтерметаліди, а також при взаємодії з елементами міжелектродного середовища – карбіди та нітриди, що сприяють покращенню властивостей поверхні.

## 2.3 Методика дослідження

В роботі використана комплексна методика дослідження, яка включає гравіметричний метод, мікроструктурний, мікродюрOMETричний та рентгеноструктурний аналіз. Такий комплекс забезпечує вивчення процесів та явищ згідно з метою роботи та задовільну точність вимірювання.

### 2.3.1 Гравіметричний метод

Гравіметричний аналіз є одним з найважливіших методів кількісного аналізу. Він відіграв велику роль при встановленні законів постійності складу

хімічних речовин, кратних відношень та періодичного закону. Його застосовували і сьогодні застосовують при визначенні хімічного складу найрізноманітніших природних і технічних об'єктів, гірських порід і руди, мінералів, металів, сплавів, неорганічних і органічних речовин. Гравіметричний аналіз широко застосовується також як арбітражний метод аналізу, якщо інші методи аналізу дають сумнівні результати [35].

Гравіметричні методи аналізу засновані на законах збереження маси і сталості складу речовин. Вони характеризуються високою точністю (0,01 – 0,005) % і гарною відтворюваністю. Основна операція гравіметричного аналізу зважування на аналітичних терезах (вагах).

Для вимірювання використовувались лабораторні електронні ваги AXIS AD50 з точністю 0,0005 г.

Для оцінки процесу формування легованого шару визначають такі характеристики як ерозію аноду  $\Delta m^a$  та приріст масу катоду  $\Delta m^k$ . Ці значення розраховують як різниця маси в момент часу  $t_n$  та за попередній вимір  $t_{n-1}$ :

$$\Delta m_t = m(t_n) - m(t_{n-1}). \quad (2.1)$$

Оскільки сума даних значень дорівнює різниці маси за останній вимір та початкової маси, то сумарна ерозія  $\Delta$  за час  $t$  розраховують за формулою:

$$\Delta t = m(t_n) - m(t_0), \quad (2.2)$$

де  $m(t_0)$  – початкова маса перед обробкою;

$m(t_n)$  – маса після обробки за час  $t$ .

Аналогічно розраховується і приріст ваги катоду  $\Delta m^k$ , але з протилежним значенням. Питомі значення цих величин відображають масоперенос на одиницю пройденого заряду. Таким чином питома ерозія  $G$  за розраховуються за формулою:



$$G = \frac{\Delta m_t}{I \cdot \Delta t}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta m_t$  – ерозія аноду або приріст ваги катоду;

$I$  – сила струму;

$\Delta t$  – час за який відбувається ерозія  $\Delta m_t$ .

Коефіцієнт масопереносу розраховується з відношення:

$$K = \frac{G^a}{G^k}, \quad (2.4)$$

де  $G^a$  – питома ерозія аноду;

$G^k$  – питомий приріст катоду.

Отже для отримання усередненого значення масопереносу маємо за час  $t$ :

$$K_t = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} K_i}{n}, \quad (2.5)$$

де  $n$  – кількість вимірів за час  $t$ .

До часових характеристик відносяться такі якісні величини:  $t_x$  – поріг крихкого руйнування нанесеного шару – час, якому відповідає максимальне значення  $\Delta m^k$  (момент першого від’ємного приросту  $\Delta m$ );  $t_{cr}$  – критичний поріг руйнування поверхневого шару – час, якому відповідає нульове значення  $\Delta m^k$ , при  $t \neq 0$  [35].

Ефективність процесу утворення зміненого поверхневого шару розраховують за формулою:

$$Y_{t_x} = K_{t_x} \cdot t_x \cdot \sum_{t=0}^{t_x} \Delta m^k, \quad (2.6)$$

та ефективність процесу утворення зміненої поверхні:

$$Y_{t_{cr}} = K_{t_{cr}} \cdot t_{cr} \cdot \sum_{t=0}^{t_{cr}} \Delta m^k. \quad (2.7)$$

Останні дві характеристики дають можливість порівнювати матеріали електродів за їх впливом на формування шару.

### 2.3.2 Мікроструктурний аналіз

Для дослідження мікроструктури зразків їх затискали у струбцини та проводилася підготовка таким чином:

- виготовлення поперечного шліфу;
- шліфування на абразивному папері різної зернистості (від 800 до 2500);
- полірування на колах, вкритих сукном, на водному розчині з оксидом хрому та на воді;
- травлення;
- фотографування.

Всі перераховані операції повинні проводитися так, щоб вони не приводили до зміни мікроструктури металу. В цьому відношенні особливо відповідальні перша і друга операції, які не повинні супроводжуватися деформацією поверхневих шарів і нагріванням зразка. Поверхня підготовленого шліфа повинна бути дзеркально гладкою, плоскою за всією його площею, не мати подряпин, ямок і забруднень [36].

Шліфування проводять з метою зменшення нерівностей на поверхні зразка. При цьому використовують шліфувальний папір різних номерів. Шліфування починають на папері з крупним зерном, поступово переходячи до обробки папером з більш дрібним зерном. На кожному виді абразивного матеріалу зразок шліфують до тих пір, поки повністю не зникнуть всі сліди подряпин від попередньої операції.

При переході від шліфування до полірування відбувалося ретельне промивання під проточною водою та просушування струбцин.

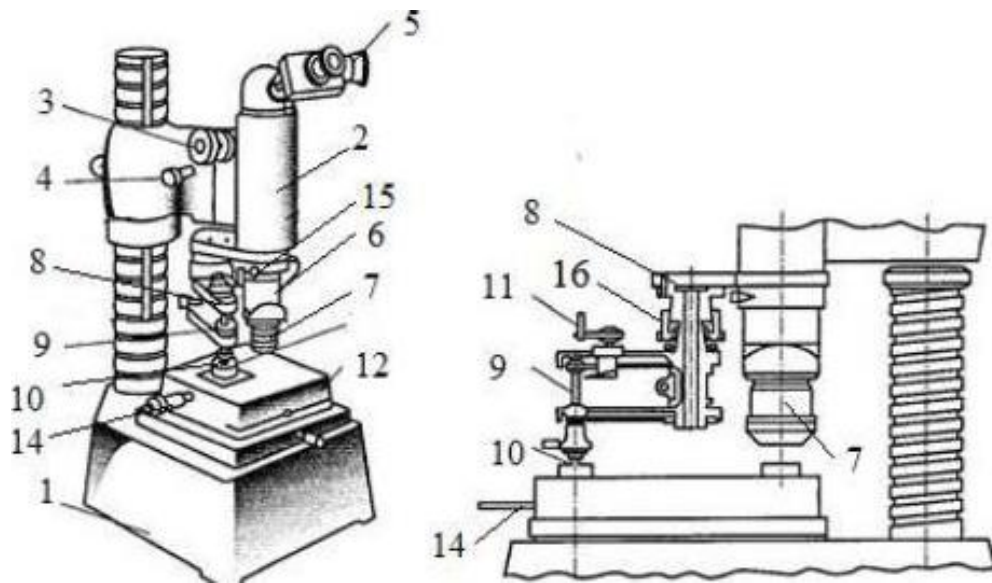
Полірування проводили для подальшого зменшення нерівностей на плоскій поверхні зразка. Для механічного полірування використовували верстат з обертальним колом, який обтягнутий сукном. Як абразив застосовували тонкоподрібнений оксид хрому, який у вигляді водяної суспензії наносили на поверхню кола під час його обертання, а далі додавали воду, щоб коло під час полірування було вологим [36].

Для виявлення мікроструктури, отримані мікрошліфи були протравлені 20 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті.

Фотографування мікроструктури відбувалося на мікроскопі «МІМ – 10» із застосуванням цифрової камери DCM 310.

### 2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз

Мікротвердість зразків вимірювали на приладі ПМТ-3 (рис. 2.3).



- 1 - основа зі штативом; 2 - тубус; 3 - макрометричний гвинт;
- 4 - мікрометричний гвинт; 5 - окулярний мікрометр; 6 - освітлювач;
- 7 - об'єктив; 8 - навантажувальний блок; 9 - стрижень для навантажувачів;
- 10 - індентор; 11 - ручка навантаження; 12 - предметний столик;
- 13 - регулювальні гвинти; 14 - ручка повороту предметного столика;
- 15 - центрувальні гвинти; 16 - тарувальний пристрій

Рисунок 2.3 – Схема приладу ПМТ – 3 для вимірювання мікротвердості [37]

Визначення мікротвердості проводиться шляхом вдавлювання стандартної алмазної пірамідки з кутом при вершині  $136^\circ$  при навантаженні 0,05 кг протягом 10 секунд. За величиною діагоналі визначали мікротвердість, користуючись табличними даними для цього приладу. Протяжність зміцненої зони визначалася за кривими розподілу мікротвердості.

Значення мікротвердості розраховували за формулою:

$$H_p = \frac{1.854 \cdot P}{d_{cp}^2}, \quad (2.8)$$

де  $H_\mu$  – значення мікротвердості;

$P$  – навантаження на індентор (точність визначення маси при навантаженні 0,05 кг складає  $\pm 0,1$  мг).

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^n (d_{i1} + d_{i2})}{2n}, \quad (2.9)$$

де  $d_{i1}$ ,  $d_{i2}$  – відповідно довжини діагоналей чотирьохкутного відбитка, мкм;

$n$  – кількість вимірювань.

Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань складає  $\pm 2$  мкм у відповідності з паспортом.

Похибка вимірювання середнього значення довжини діагоналей відбитка визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{cp} - \frac{d_{i1} + d_{i2}}{2})^2}{n-1}}, \quad (2.10)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.11)$$

де  $n$  – кількість вимірювань.

Таким чином значення мікротвердості визначається за формулою:

$$H_{\mu} = \frac{1.854 \cdot P}{(d_{cp} \pm \sigma_0)}. \quad (2.12)$$

Відносна похибка вимірювання  $\delta H_{\mu}$  визначається за формулою:

$$\delta H_{\mu} = \left| \frac{H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0)}{H_{\mu}(d_{cp})} \right| \times 100\%. \quad (2.13)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta H_{\mu} = H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0). \quad (2.14)$$

Коефіцієнт зміцнення поверхні  $K$  був знайдений як відношення мікротвердості легovanого шару до мікротвердості основи:

$$K = \frac{H_{лш}}{H_{осн}}. \quad (2.15)$$

### 2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз

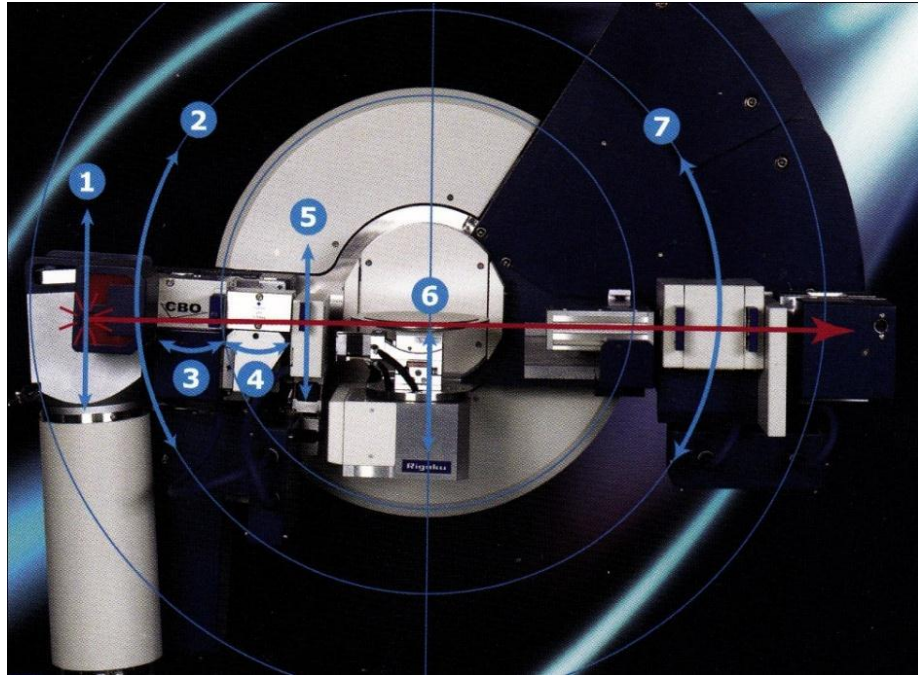
Рентгеноструктурний аналіз проведено з використанням дифрактометра «Ultima IV» фірми «Rigaku» (рис. 2.4) у мідному монохроматизованому випромінюванні ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ).



Рисунок 2.4 – Дифрактометр “Ultima IV” фірми “RIGAKU” [38]

Визначено: якісний фазовий аналіз покриттів; кількісний аналіз фаз; період ґратки; розмір кристалітів; досконалість кристалічної структури. Зйомка проводилась за напруги 30 кВ та струму 30 мА.

Схема камери установки Rigaku Ultima IV зображена на рисунку 2.5.



1 – висота джерела; 2 – кут джерела; 3 – поперечна оптична балка;  
4 – кристалооптика; 5 – висота прорізу; 6 – поверхня зразка; 7 – кут ходу  
детектора

Рисунок 2.5 – Схема установки Rigaku Ultima IV [38]

Рентгенофазовий аналіз проводився для встановлення наявності фаз в досліджуваному зразку і їх ідентифікації (якісний аналіз).

Фазовий аналіз оснований на порівнянні експериментальних і теоретичних даних по міжплощинним відстаням ( $d/n$ ) та інтенсивності ліній, які були отримані при зйомці рентгенограми.

Визначення міжплощинних відстаней проводилося за формулою Вульфа-Брегга:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.16)$$

де  $d$  – міжплощинна відстань;

$\Theta$  – бреггівський кут;

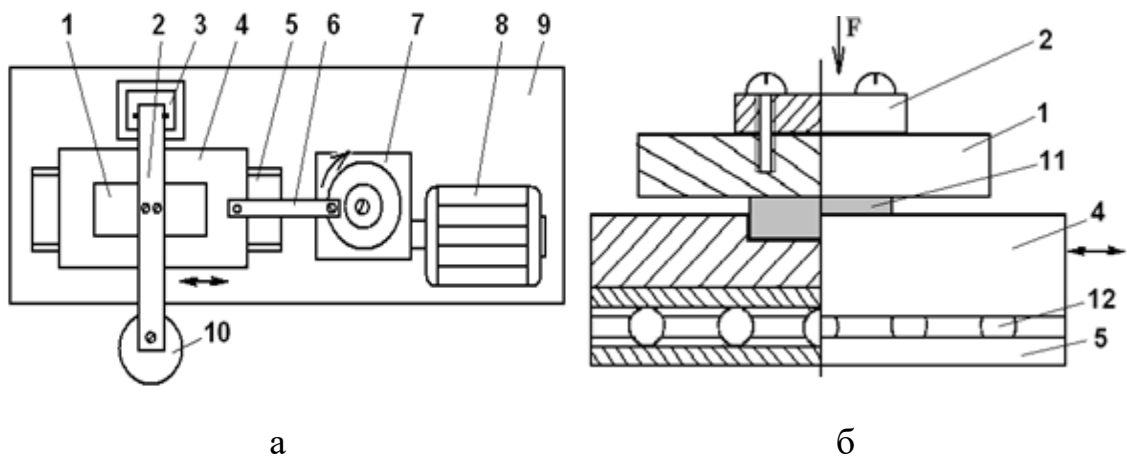
$\lambda$  – довжина хвилі обраного випромінення;

$n$  – порядок відбиття.

Так як довжина хвилі  $\lambda$  для даного випромінення відома, то задача зводиться до знаходження кутів  $\Theta$  для всіх рефлексів рентгенограми. Ідентифікація фаз проводилася за картотекою ASTM шляхом порівняння міжплощинних відстаней та інтенсивності рефлексів. Фаза вважалася присутньою при наявності трьох і більше рефлексів.

### 2.3.5 Випробування на зносостійкість

Випробування на зносостійкість проводилися на установці тертя, сконструйованій за принципом зворотно-поступального руху за схемою “площина по площині” в умовах тертя-ковзання без мастила (рис 2.6).



а

б

а – загальний вигляд; б – вузол тертя

1 – контртіло; 2 – важіль; 3 – кріплення важеля; 4 – рухома платформа;

5 – нерухома платформа; 6 – шатун; 7 – редуктор; 8 – електродвигун;

9 – станина; 10 – гиря; 11 – зразок; 12 – підшипник

Рисунок 2.6 – Схема установки тертя [39]

Принцип дії установки є таким: обертання від електродвигуна постійного струму передається на шатун. Рухома платформа здійснює

зворотно-поступальний рух по напрямним за допомогою шатуна, прикріпленого до обертальної частини редуктора. На рухомій платформі розміщено досліджуваний зразок, який контактує з контртілом (сталь Р6М5), закріпленим на важелі, під час дії навантаження (гиря) 4 кг.

Величина зношування оцінювалася ваговим методом – зважування зразка через пройдені кожні 96 метрів випробування (загальний пройдений шлях становить 1056 м) з використанням лабораторних електронних вагів AXIS AD50 (точність визначення маси 0,0005 г).

За втратою маси обчислювався показник інтенсивності зношування  $I$ , кг/м<sup>2</sup>:

$$I = \frac{\Sigma \Delta m}{S}, \quad (2.17)$$

де  $\Delta m$  – втрата маси, кг;

$S$  – площа поверхні тертя зразка, м<sup>2</sup>.

За розрахованими значеннями  $I$  побудовано кінетичні криві інтенсивності зношування покриття в залежності від пройденного часу.

## 2.4 Висновки до розділу 2

1. Були зарекомендовані режими послідовного ЕІЛ сталі ХВГ хромом, алюмінієм та вуглецем у різних послідовностях (Cr – Al – C, Cr – C – Al, Al – Cr – C, Al – C – Cr, C – Al – Cr, C – Cr – Al).

2. Обґрунтовано вибір матеріалу дослідження та легувальних анодів.

3. З'ясована доцільність використання комплексної методики дослідження, що складається з: гравіметричного методу, мікроструктурного, мікродюрOMETричного та рентгеноструктурного аналізів для встановлення об'єктивних даних щодо структури та властивостей поверхневих шарів сталі ХВГ.



### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Метою даної роботи є дослідження формування мікроструктури, фазового складу та мікротвердості поверхневих шарів сталі ХВГ після комплексної обробки у послідовності: пошарове електроіскрове легування (хромовим, алюмінієвим та вуглецевим анодами).

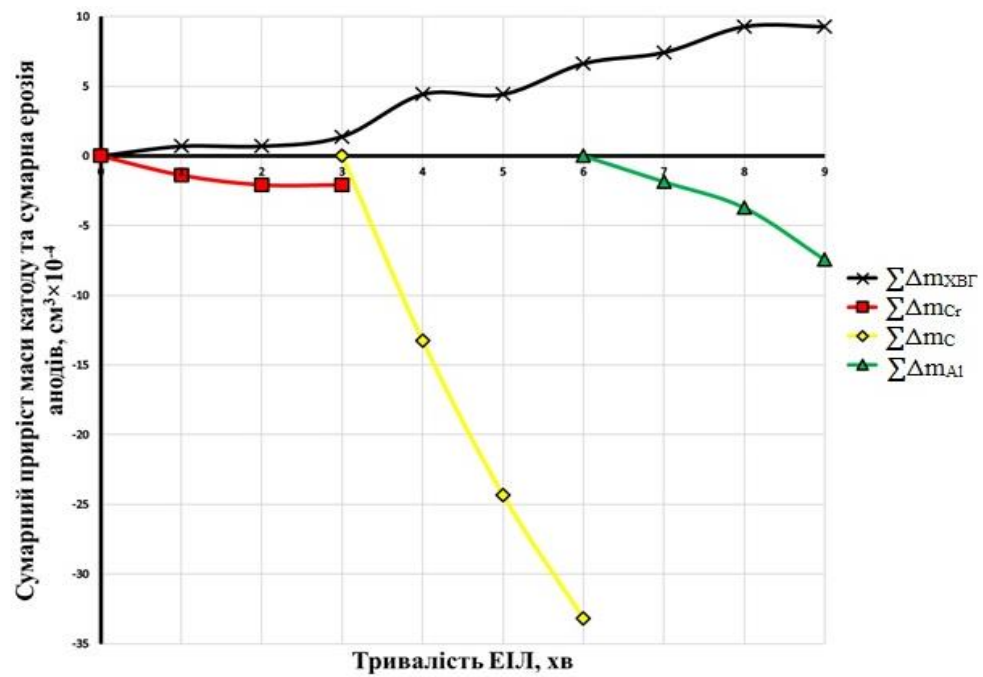
Для досягнення поставленої мети було проведено ЕІЛ зразків зі сталі ХВГ на повітрі за режимів: струм обробки – 1,5 А, напруга – 60 В. Тривалість обробки, яка припадає на кожний етап легуючим елементом (анодом), – 180 с (3 хвилини).

#### 3.1 Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення хрому

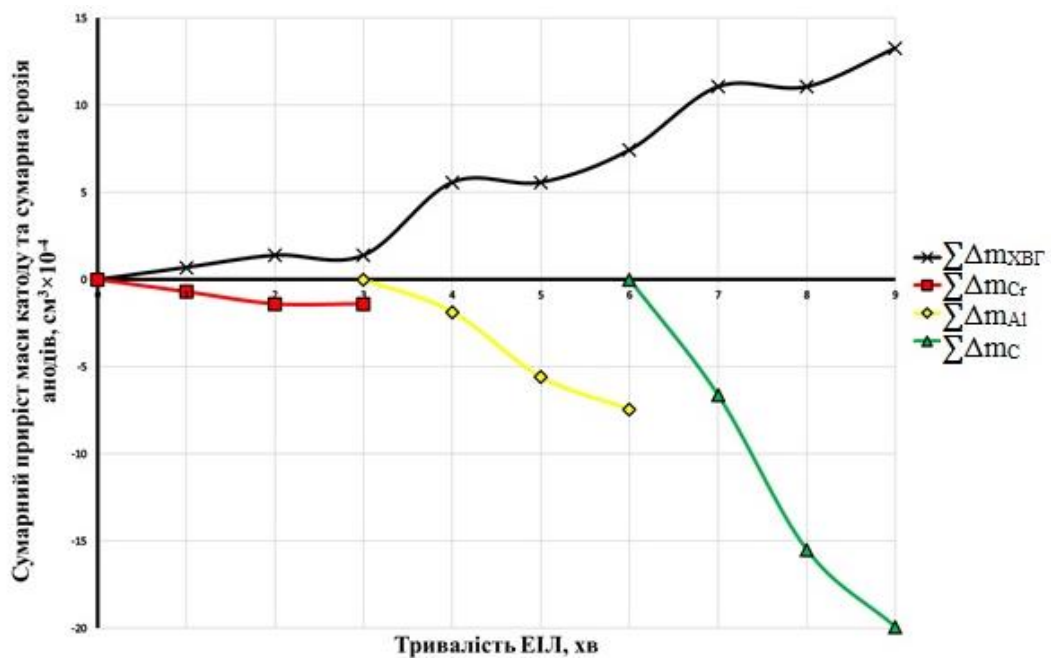
Для вивчення процесів формування легованих шарів на поверхні сталі ХВГ був проведений гравіметричний аналіз та визначенні приріст маси катоду ( $\Delta m^k$ ) та ерозія анодів ( $\Delta m^a$ ), а також сумарні величини приросту маси катоду ( $\Sigma \Delta m^k$ ) та ерозії анодів ( $\Sigma \Delta m^a$ ). За результатами вимірів побудовані криві протягом всього процесу легування із зазначенням об'ємного фактору (рис. 3.1), тобто з урахуванням густини матеріалів анодів ( $\rho_{Al} = 2,69 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{Cr} = 7,18 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_C = 2,26 \text{ г/см}^3$ ).

Для процесу ЕІЛ із початковою стадією нанесення хрому крива  $\Sigma \Delta m^k$  знаходиться в додатній області, що свідчить про відсутність крихкого руйнування нанесеного покриття. Криві  $\Sigma \Delta m^a$  хромового та алюмінієвого анодів плавно зменшуються, що свідчить про постійну ерозію матеріалу. Ерозія вуглецевого аноду відбувається інтенсивніше, оскільки графік  $\Sigma \Delta m^a_C$  має більший кут нахилу (більша втрата маси).

Збільшення маси зразка на першій та другій стадії процесу можна пояснити утворенням твердих розчинів необмеженої розчинності хрому з залізом та пересиченого твердого розчину хрому з алюмінієм.



а)



б)

а) – схема легування Cr – C – Al, б) – схема легування Cr – Al – C

Рисунок 3.1 – Кінетичні криві сумарного приросту маси катоду та сумарної ерозії анодів в залежності від тривалості легування

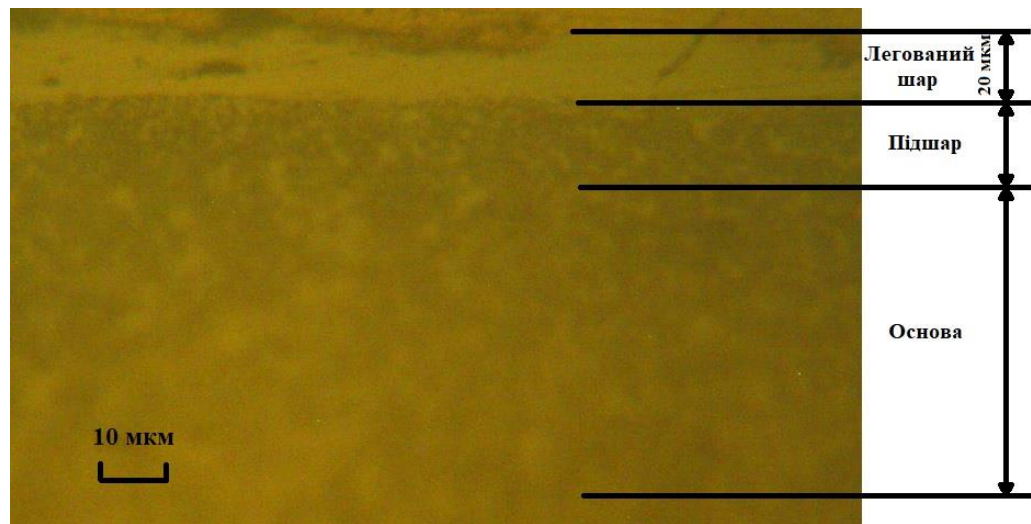
Деякі параметри процесу легування зазначені в таблиці 3.1.

Як видно з таблиць 3.1, загальний коефіцієнт масоперенесення  $K_{\Pi}$  становить 69,16 % та 59,53 % відповідно до схем легування.

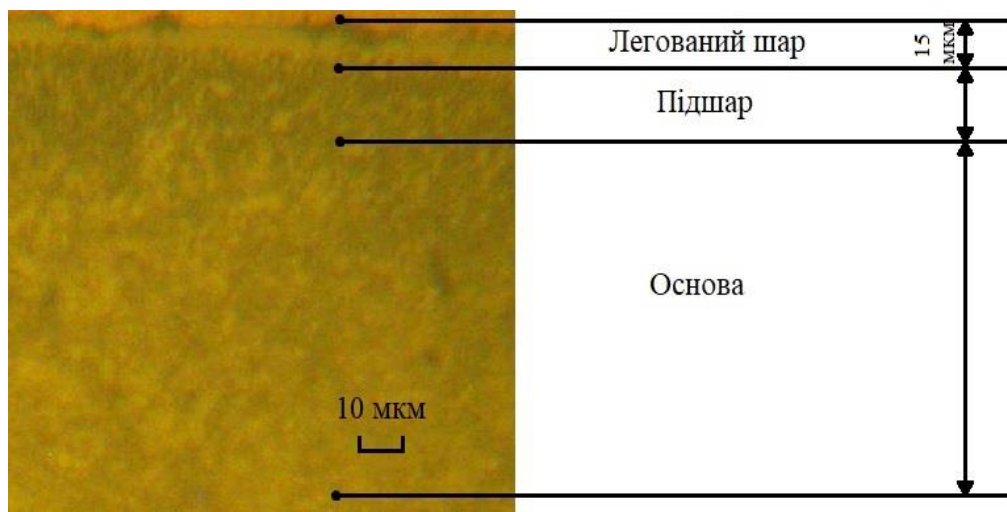
Таблиця 3.1 – Параметри кінетики процесу ЕІЛ

Тривалість ЕІЛ, хв.	Приріст маси катоду $\Delta m^k, 10^{-4} \text{ см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_1,$ $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_2,$ $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_3,$ $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Коефіцієнт масопереносу $K, \%$	Середній коефіцієнт масопереносу протягом стадії $K_c, \%$	Загальний коефіцієнт масоперенеосу за процес $K_{\Sigma}, \%$
Cr – C – Al							
0	0	0	-	-	0	10	69,16
1	-0,69	-1,39	-	-	-50		
2	0	-2,09	-	-	0		
3	0,69	-2,09	0	-	33,33		
4	2,22	-	-13,27	-	16,66	16,66	
5	2,22	-	-24,33	-	9,09		
6	4,43	-	-33,18	0	13,33		
7	5,57	-	-	-1,86	300		
8	7,44	-	-	-3,72	200		
9	7,44	-	-	-7,44	100		
Cr – Al – C							
0	0	0	-	-	0	-16,66	59,53
1	-0,69	-0,69	-	-	-100		
2	0	-1,39	-	-	0		
3	0,69	-1,39	0	-	50		
4	1,86	-	-1,86	-	100	88,88	
5	3,72	-	-3,72	-	66,66		
6	7,44	-	-1,86	0	100		
7	11,06	-	-	-6,64	166,66		
8	13,27	-	-	-8,85	85,72		
9	13,27	-	-	-4,43	66,66		

На рисунку 3.2 зображені мікроструктури зразків із сталі ХВГ після ЕІЛ. Для схеми легування Cr – C – Al товщина легованого шару становить 20 мкм, товщина підшару варіюється у межах 15 мкм. Для схеми легування Cr – Al – C було отримано покриття товщиною 15 мкм. Під ним знаходиться перехідна зона (підшар) протяжністю 10 мкм, далі знаходиться основа.



а)



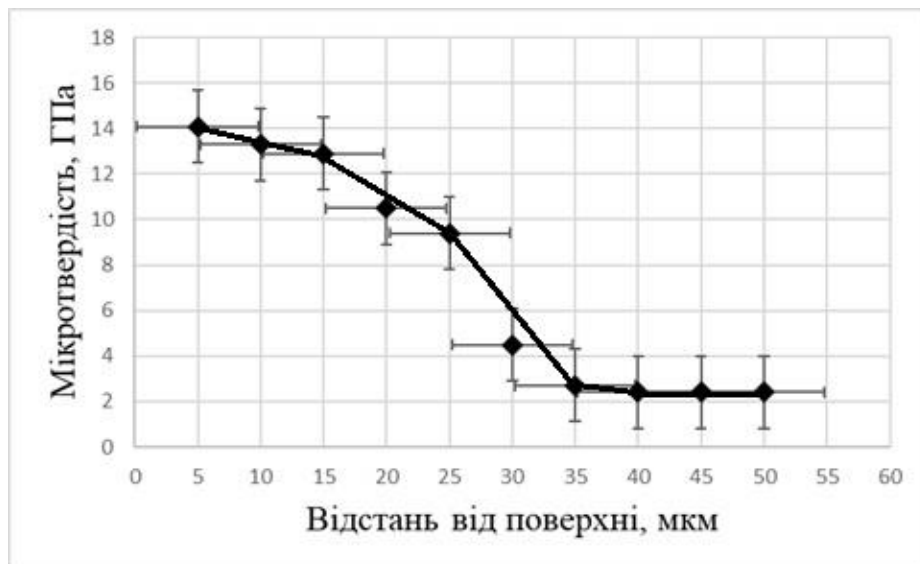
б)

а) – схема легування Cr – C – Al, б) – схема легування Cr – Al – C

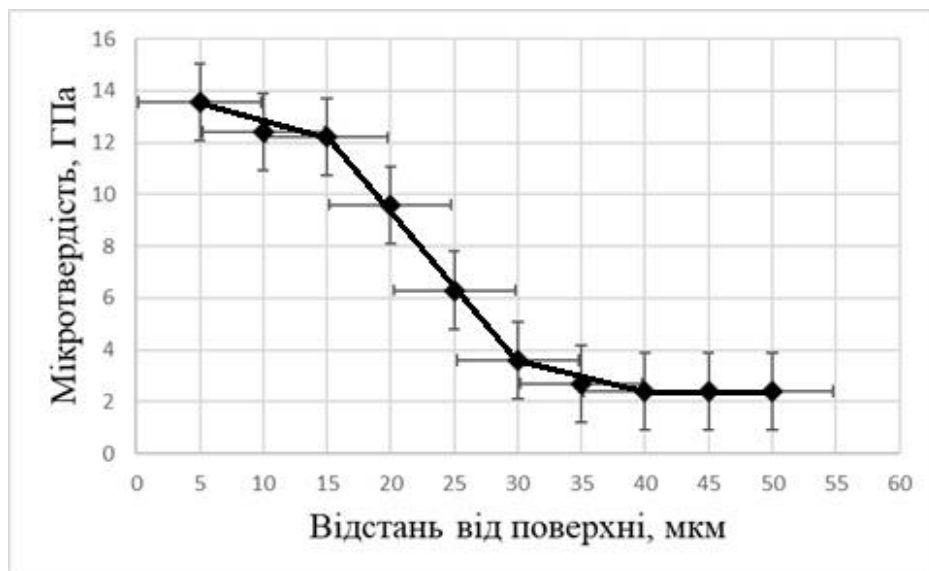
Рисунок 3.2 – Мікроструктура обробленої ділянки сталі ХВГ після ЕІЛ

Легування сталі ХВГ призвело до збільшення мікротвердості зразків. На рисунку 3.3 зображено графіки розподілу мікротвердості від товщини шару для відповідних схем легування.

За даними рисунку 3.3 можна сказати, що мікротвердість легованих шарів сталі ХВГ після електроіскрового легування за схемами Cr – C – Al та Cr – Al – C становлять 14,08 ГПа та 13,56 ГПа на відстані 5 мкм від поверхні зразків. Зміцнені зони становлять 15 мкм та 10 мкм. А з 25 мкм значення мікротвердості зразків відповідають основі (2,4 ГПа).



а)



б)

а) – схема легування Cr – C – Al, б) – схема легування Cr – Al – C

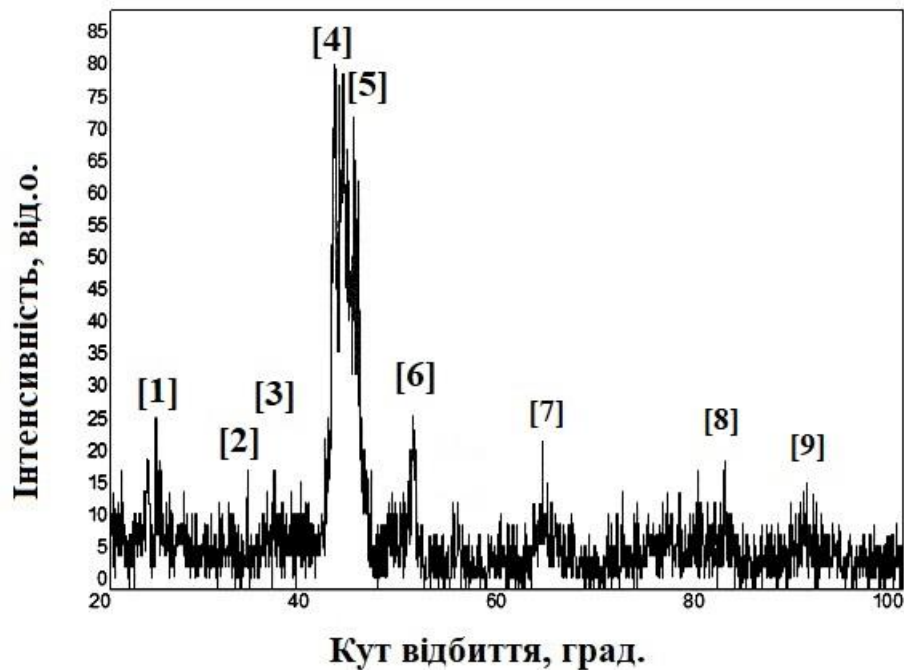
Рисунок 3.3 – Розподіл мікротвердості за відстанню від поверхні сталі ХВГ

Враховуючи дані гравіметричного та мікроструктурного аналізів був розрахований критерій формування легованого, який для обох схем легування становить 0,31 та 0,47. Щоб урахувати внесок отриманих властивостей покриттів, розраховано коефіцієнт  $\gamma_v$  (Cr – C – Al – 5,86; Cr – Al – C – 5,65), враховуючи співвідношення максимальної мікротвердості покриття та мікротвердості необробленої основи. Для розрахунку функціонального критерію

ефективності ( $\gamma_F$ ) ЕІЛ були враховані  $\gamma_B$  та  $\gamma_{\text{ЛШ}}$ . Для ЕІЛ за схемою Cr – C – Al такий показник становить 1,81, а для Cr – Al – C – 2,67.

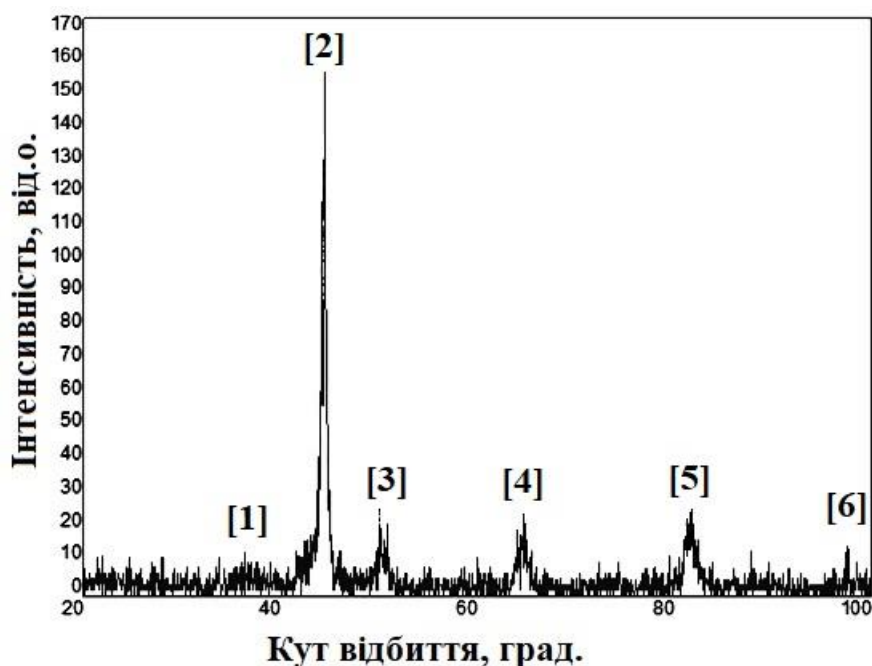
За результатами мікроструктурного та мікродюрOMETричного було обрані зразки зі сталі ХВГ із початковою стадією легування хромом для дослідження рентгеноструктурним аналізом.

Досліджуючи отримані результати рентгеноструктурного аналізу (рис. 3.4 та рис. 3.5), визначено, що після ЕІЛ із початковою стадією нанесення хрому присутні фази карбідів, нітридів, інтерметалідів, пренасичених твердих розчинів.



- [1] – Al<sub>4</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub> (361); [2] - Al<sub>4</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub> (244);  
 [3] – (Fe, Cr) (002); Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (420); [4] – Fe<sub>3</sub>C (101); (Fe, Cr) (410); Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (511);  
 [5] –  $\alpha$ -Fe (110); (Fe, Cr) (330); [6] – Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (440);  
 Al<sub>4</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub> (18 1 2); [7] -  $\alpha$ -Fe (200); Fe<sub>3</sub>C (200); [8] -  $\alpha$ -Fe (211);  
 Fe<sub>3</sub>C (211); [9] - Al<sub>4</sub>Fe<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub> (13 3 10)

Рисунок 3.4 – Дифрактограма зразка сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Cr – C – Al



[1] –  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (420); [2] -  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (511); [3] -  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (420); [4] –  $\alpha\text{-Fe}$  (200);  
[5] -  $\alpha\text{-Fe}$  (211); [6] -  $\alpha\text{-Fe}$  (220)

Рисунок 3.5 – Дифрактограма зразка сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Cr – Al – C

Детальні дані, щодо індиціювання отриманих дифрактограм, наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати рентгеноструктурного аналізу зразка сталі ХВГ після ЕІЛ із початковою стадією нанесення хрому

№	Кут відбиття, град.	Міжплощинна відстань, Å	Фаза
Cr – C – Al			
1	23,5862	3,76	$\text{Al}_{477.44}\text{Cr}_{63.42}\text{Fe}_{51.42}$ (361)
2	33,7931	2,65	$\text{Al}_{477.44}\text{Cr}_{63.42}\text{Fe}_{51.42}$ (244)
3	36,5624	2,26	(Fe, Cr) (002); $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (420)
4	43,30(9)	2,08	$\text{Fe}_3\text{C}$ (101); (Fe, Cr) (410); $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (511)
5	44,6897	2,02	$\alpha\text{-Fe}$ (110); (Fe, Cr) (330)
6	50,47(8)	1,807	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (440); $\text{Al}_{477.44}\text{Cr}_{63.42}\text{Fe}_{51.42}$ (18 1 2)
7	63,3103	1,467	$\alpha\text{-Fe}$ (200); $\text{Fe}_3\text{C}$ (200); FeAl (200)
8	81,7931	1,176	$\alpha\text{-Fe}$ (211); $\text{Fe}_3\text{C}$ (211)
9	90,2069	1,087	$\text{Al}_{477.44}\text{Cr}_{63.42}\text{Fe}_{51.42}$ (13 3 10)
Cr – Al – C			
1	36,8056	2,43	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ (420)

Продовження таблиці 3.2

№	Кут відбиття, град.	Міжплощинна відстань, Å	Фаза
2	44,31(4)	2,04	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> (511); α-Fe (110)
3	50,4(2)	1,809	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> (420)
4	64,76(15)	1,438	α-Fe (200)
5	81,31(13)	1,182	α-Fe (211)
6	97,6389	1,023	α-Fe (220)

Взявши до уваги результати мікроструктурного та мікродюрOMETричного аналізів було проведено випробування на зносостійкість (рис. 3.6) зразків сталі ХВГ до і після ЕІЛ із початковою стадією легування хромом.

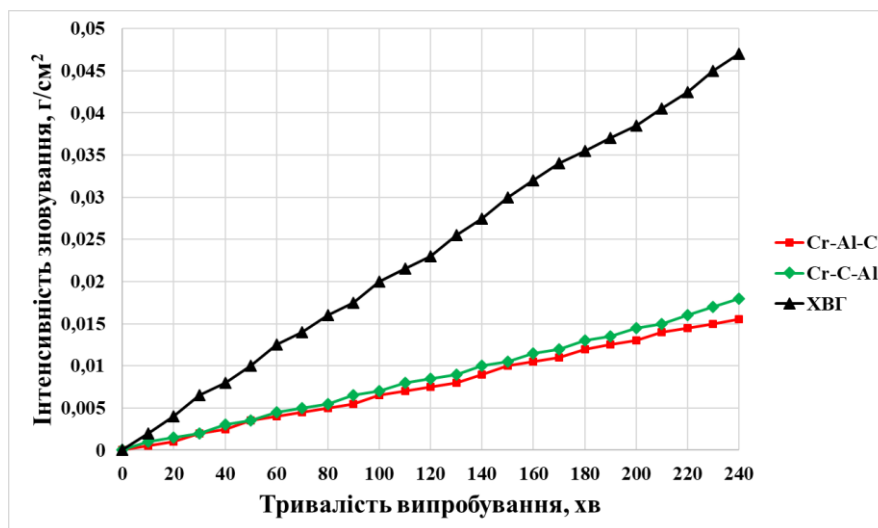


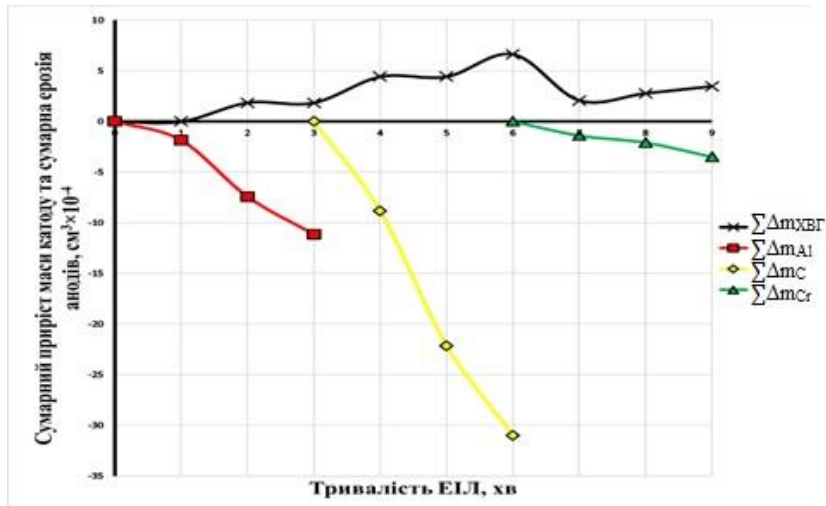
Рисунок 3.6– Інтенсивність зношування сталі ХВГ до і після ЕІЛ із початковою схемою легування хромом

Як видно криві зношування для покриттів відрізняються від вихідного зразка – значення інтенсивності зношування у 2,4 рази для сталі з покриттям Cr – C – Al та у 3,6 рази для покриття Cr – Al – C менше, ніж ХВГ. Тобто зносостійкість, яка є оберненою величиною до інтенсивності зношування, для Cr – Al – C покриття є більшою, ніж для шару Cr – C – Al. Це можна пояснити наявністю на поверхні шару графіту, який може виконувати роль твердого мастила під час випробувань.

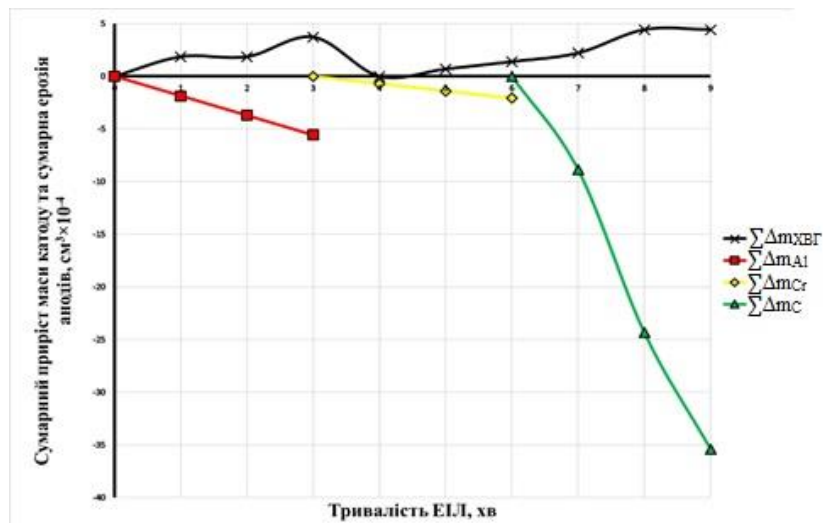


### 3.2 Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення алюмінію

Для виявлення закономірностей формування покриттів, одержаних в послідовності Al – C – Cr та Al – Cr – C, вивчалася кінетика масоперенесення (рис. 3.7).



а)



б)

а) – схема легування Al – C – Cr, б) – схема легування Al – Cr – C

Рисунок 3.7 – Кінетичні криві сумарного приросту маси катоду та сумарної ерозії анодів в залежності від тривалості легування

Крива сумарного приросту маси катоду знаходиться у додатній області, крихке руйнування не спостерігається. Криві сумарної ерозії анодів мають

спадаючий характер на всіх трьох стадіях процесу легування. Потрібно зазначити, що ерозія вуглецевого аноду для схем легування з початковою стадією нанесення алюмінію відбувається більш інтенсивно. Це можна пов'язати з тим, що під час механічного контакту легувального електроду уже з нанесеним покриттям відбувається утворення великої кількості карбіду алюмінію та карбіду хрому. Карбіди є результатом взаємодії матеріалів обох електродів. Характерною особливістю процесу є зниження маси легованого шару під час першої стадії легування хромом. Це залежить від температури плавлення анодів.

Деякі параметри процесів легування зазначенні в таблиці 3.3.

Загалом масоперенесення за схемою Al – C – Cr становить 25,47 %, а для схеми легування Al – Cr – C – 43,23 %.

Таблиця 3.3 – Параметри кінетики процесу ЕІЛ

Тривалість ЕІЛ, хв.	Приріст маси катоду $\Delta m^k$ , $10^{-4}$ $cm^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_1$ , $10^{-4}$ $cm^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_2$ , $10^{-4}$ $cm^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_3$ , $10^{-4}$ $cm^3$ .	Коефіцієнт масопереносу K, %	Середній коефіцієнт масопереносу протягом стадії Kс, %	Загальний коефіцієнт масопереносу за процес Kл, %
Al – C – Cr							
0	0	0	-	-	0	-33,33	25,47
1	-1,86	-1,86	-	-	-100		
2	0	-7,44	-	-	0		
3	0	-11,15	0	-	0		
4	2,22	-	-8,84	-	25	16,43	
5	2,22	-	-22,13	-	10		
6	4,43	-	-30,97	0	14,26		
7	1,39	-	-	-1,39	100	93,33	
8	2,09	-	-	-2,09	100		
9	2,78	-	-	-3,48	80		
Al – Cr – C							
0	0	0	-	-	0	72,22	43,23
1	1,86	-1,85	-	-	100		
2	0	-3,71	-	-	50		
3	1,86	-5,57	0	-	66,66		

Продовження таблиці 3.3

Тривалість ЕІЛ, хв.	Приріст маси катоду $\Delta m^k$ , $10^{-4}$ $\text{см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_1$ , $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_2$ , $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Ерозія аноду $\Delta m^a_3$ , $10^{-4} \text{ см}^3$ .	Коефіцієнт масопереносу $K$ , %	Середній коефіцієнт масопереносу протягом стадії $K_c$ , %	Загальний коефіцієнт масоперенеосу за процес $K_p$ , %
4	-1,39	-	-0,69	-	0	38,88	43,23
5	0,69	-	-1,39	-	50		
6	0,69	-	-2,09	0	66,66		
7	-2,21	-	-	-8,85	25	18,56	
8	2,21	-	-	-24,34	18,18		
9	0	-	-	-35,39	25		

За даними мікроструктурного аналізу зразка із сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою Al – С – Cr, товщина легованого шару становить 15 мкм. Протяжність зміцненого шару – 15 мкм (рис. 3.8).

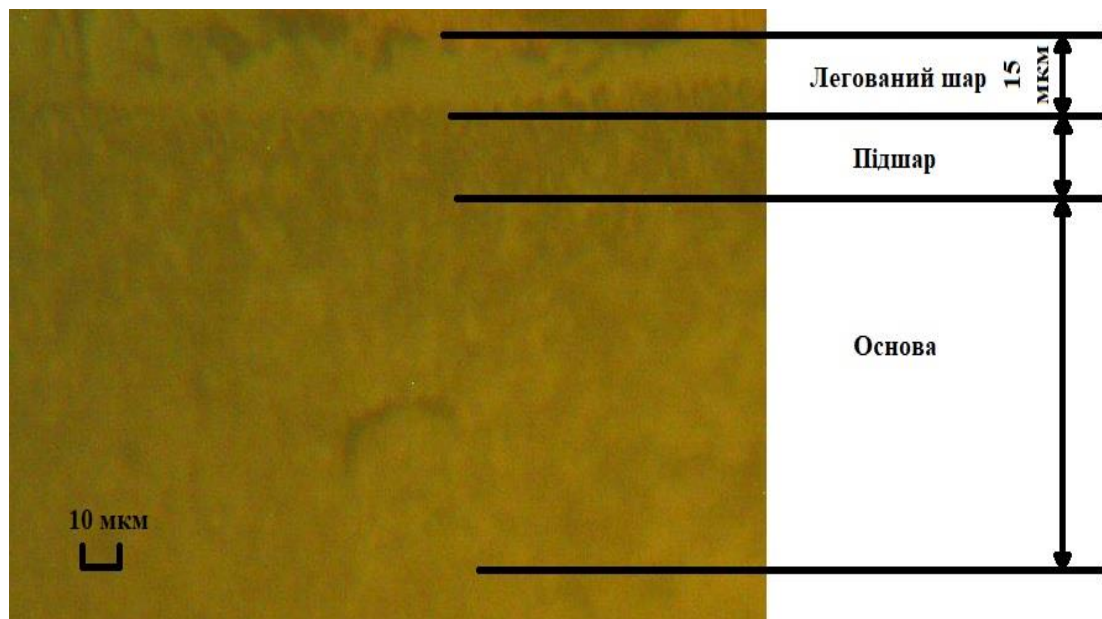


Рисунок 3.8 – Мікроструктура обробленої ділянки сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Al – С – Cr

Після електроіскрового легування зразка із сталі ХВГ за схемою Al – Cr – С, була отримана мікроструктура, яка зображена на рисунку 3.9.

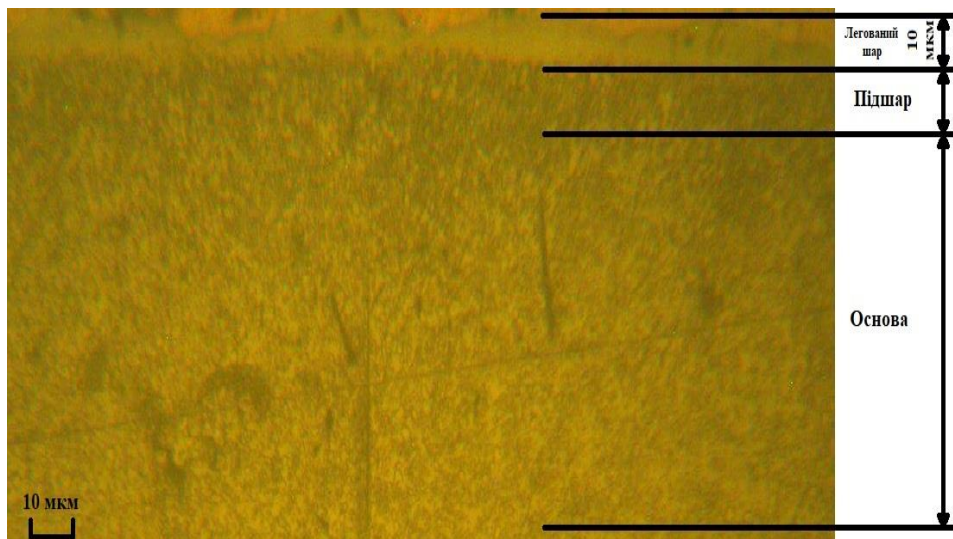


Рисунок 3.9 – Мікроструктура обробленої ділянки сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Al – Cr – C

Товщина покриття – 10 мкм. Зона термічного впливу простягається на відстані 10 мкм.

За даними мікродюрOMETричного аналізу максимальна мікротвердість легованого шару за схемою Al – C – Cr становить 8,86 ГПа (рис. 3.10).

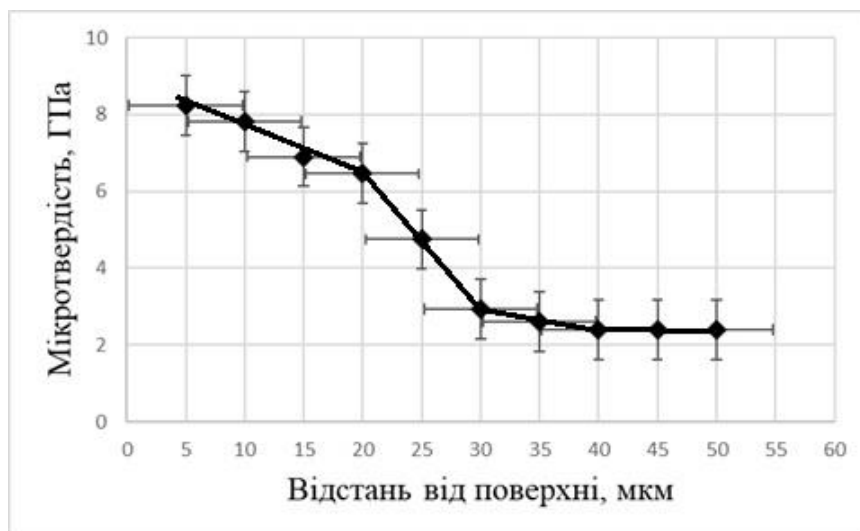


Рисунок 3.10 – Розподіл мікротвердості за відстанню від поверхні сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Al – C – Cr

Мікротвердість потрійного покриття (Al – Cr – C) на сталі ХВГ становить 8,24 ГПа (рис. 3.11).

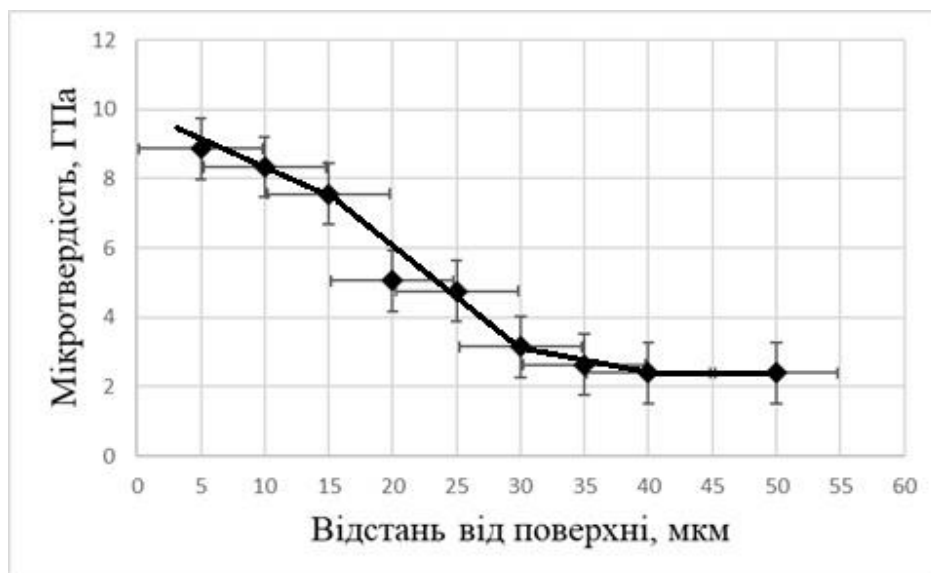


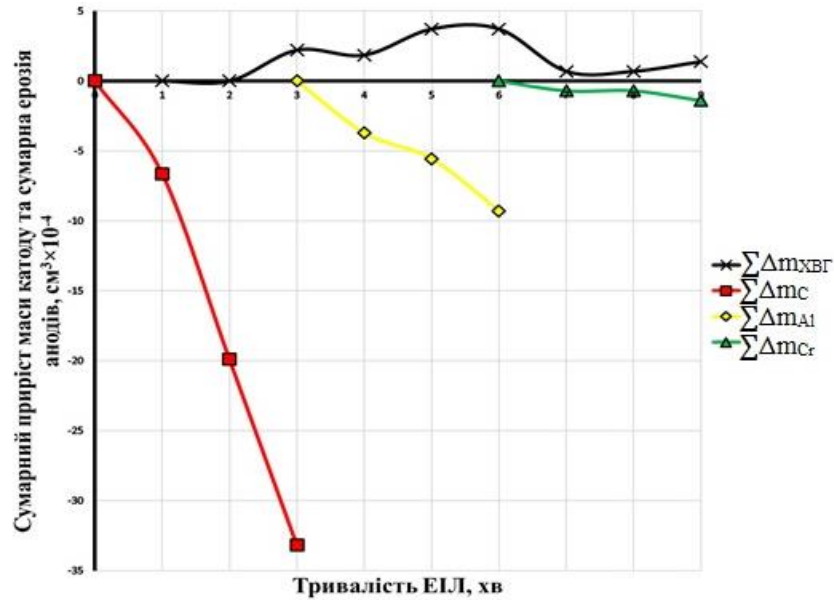
Рисунок 3.11 – Розподіл мікротвердості за відстанню від поверхні сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою легування Al – Cr – C

Взявши до уваги результати гравіметричного та мікроструктурного аналізів був розрахований критерій формування легованих шарів, який становить 0,11 та 0,04 для відповідних схем легування. Щоб виявити внесок властивостей покриття, розраховано коефіцієнт  $\gamma_B$  (Al – C – Cr – 3,69; Al – Cr – C – 3,43) за співвідношенням максимальних значень мікротвердості легованого шару та основи без обробки. Функціональний критерій ефективності ЕІЛ ( $\gamma_F$ ) знайдено з добутку  $\gamma_B$  та  $\gamma_{ЛШ}$ . Для обробки за схемою Al – C – Cr він становить 0,42, а для Al – Cr – C – 0,14.

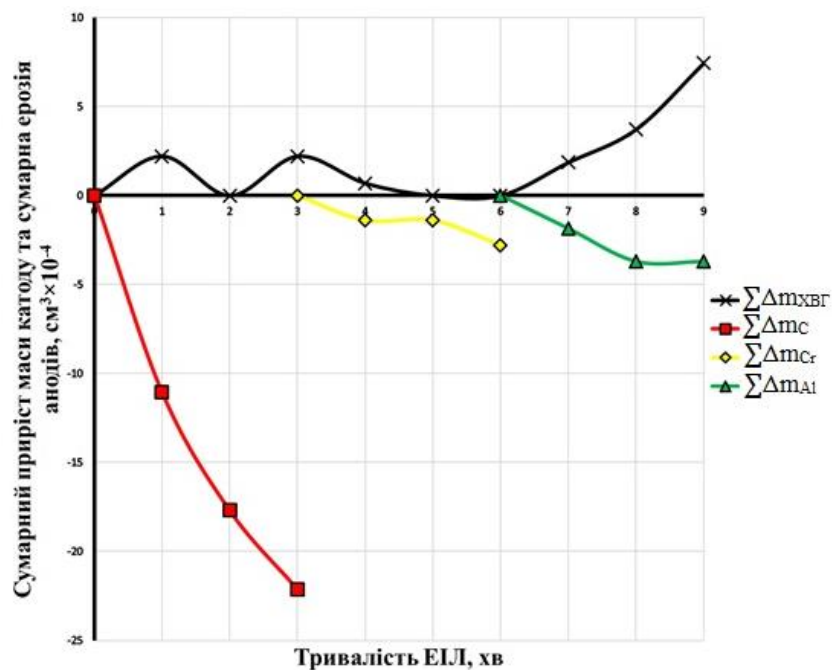
### 3.3. Формування покриттів в процесі електроіскрового легування із початковою стадією нанесення вуглецю

Кінетику формування легованого шару було визначено за допомогою гравіметричного аналізу, контролюючи маси катоду та легувальних анодів після кожної хвилини легування. За отриманими результатами гравіметричного аналізу були побудовані кінетичні криві сумарного масоперенесення матеріалів анодів та катоду (рис. 3.12).

Криві сумарного приросту маси катоду мають додатні значення, що підтверджує відсутність крихкого руйнування легованого шару. Криві сумарної ерозії анодів мають від'ємні значення.



а)



б)

а) – схема легування С – Al – Cr, б) – схема легування С – Cr – Al

Рисунок 3.12 – Кінетичні криві сумарного приросту маси катоду та сумарної ерозії анодів в залежності від тривалості легування

Деякі параметри процесу легування зазначені в таблиці 3.4.

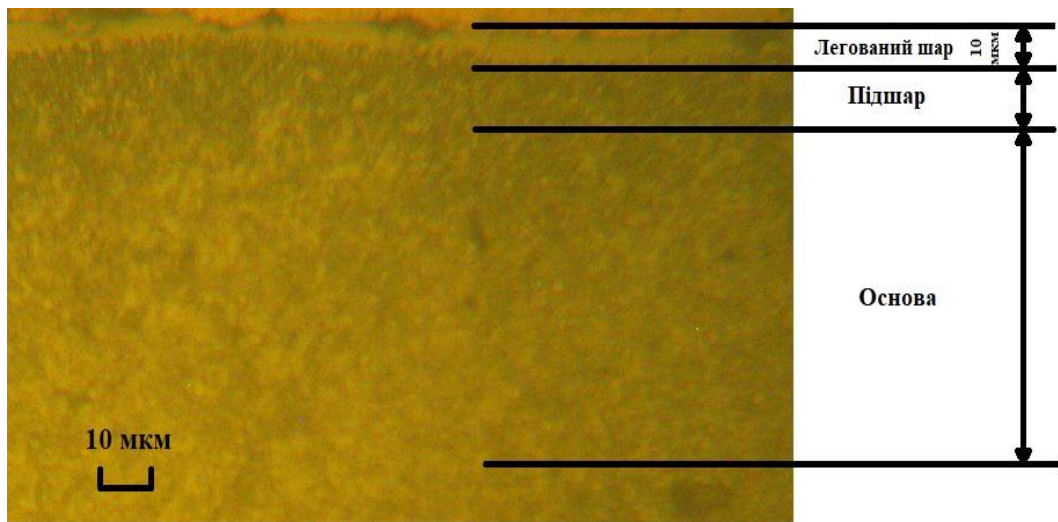
Загальний коефіцієнт масоперенесення  $K_{\Pi}$  після електроіскрового легування сталі ХВГ за схемою С – Al – Cr становить 51,48 %, для схеми легування С – Cr – Al – 42,22 %.

Таблиця 3.4 – Параметри кінетики процесу ЕІЛ

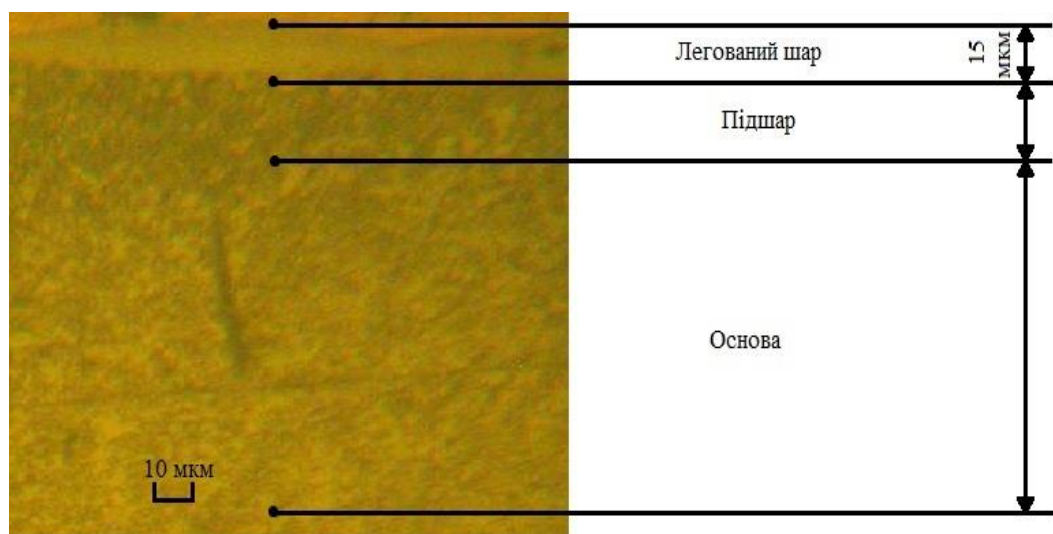
Тривалість ЕІЛ, хв.	Приріст маси катоду $\Delta m^k$ , $10^{-4}$ см <sup>3</sup> .	Ерозія аноду $\Delta m^a_1$ , $10^{-4}$ см <sup>3</sup> .	Ерозія аноду $\Delta m^a_2$ , $10^{-4}$ см <sup>3</sup> .	Ерозія аноду $\Delta m^a_3$ , $10^{-4}$ см <sup>3</sup> .	Коефіцієнт масопереносу $K$ , %	Середній коефіцієнт масопереносу протягом стадії $K_C$ , %	Загальний коефіцієнт масоперенеосу за процес $K_{\Pi}$ , %
C – Al – Cr							
0	0	0	-	-	0	2,22	51,48
1	0	-6,64	-	-	0		
2	0	-19,92	-	-	0		
3	2,21	-33,18	0	-	6,66	52,22	
4	1,86	-	-3,71	-	50		
5	3,72	-	-5,57	-	66,66		
6	3,72	-	-9,29	0	40		
7	0,69	-	-	-0,69	100	100	
8	0,69	-	-	-0,69	100		
9	1,39	-	-	-1,39	100		
C – Cr – Al							
0	0	0	-	-	0	10	42,22
1	2,22	-11,06	-	-	20		
2	0	-17,69	-	-	0		
3	2,22	-22,13	0	-	10	16,66	
4	0,69	-	-1,39	-	50		
5	0	-	-1,39	-	0		
6	0	-	-2,78	0	0		
7	1,86	-	-	-1,85	100	100	
8	3,72	-	-	-3,72	100		
9	7,44	-	-	-3,72	100		

На рисунку 3.13 зображено мікроструктури отриманих зміцнених шарів зразків сталі ХВГ після ЕІЛ із початковою стадією нанесення вуглецю.





а)



б)

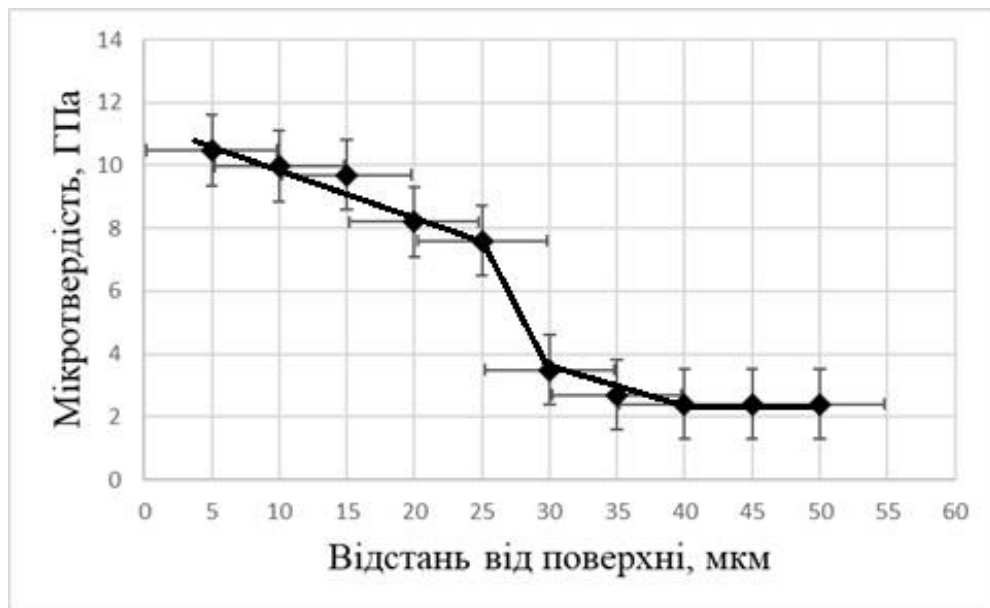
а) – схема легування С – Al – Cr, б) – схема легування С – Cr – Al

Рисунок 3.13 – Мікроструктура обробленої ділянки сталі ХВГ після ЕІЛ

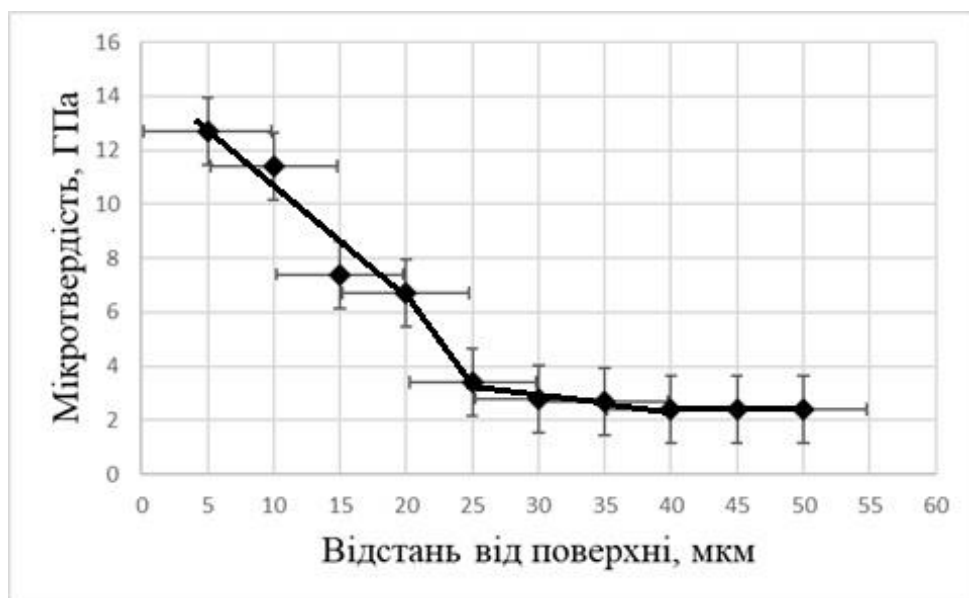
Мікроструктура зміцнених шарів складається з легованого шару, зони термічного впливу та мікроструктури матеріалу основи. Товщина легованого шару варіюється у значеннях (10-15) мкм відповідно до схем легування. Розмір зони термічного впливу для обох схем легування становить по 10 мкм.

За результатами мікродюрOMETричного аналізу були побудовані графіки залежності мікротвердості поверхневого шару сталі ХВГ від відстані до поверхні після ЕІЛ (рис. 3.14).





а)



б)

а) – схема легування С – Al – Cr, б) – схема легування С – Cr – Al

Рисунок 3.14 – Розподіл мікротвердості за відстанню від поверхні сталі ХВГ після ЕІЛ

Зі збільшенням відстані від поверхні зразків, мікротвердість поверхневої зони плавно зменшується від 10,48 ГПа для схеми легування С – Al – Cr та від 12,68 ГПа для схеми легування С – Cr – Al, і досягає значення твердості основи на глибині 20 мкм. Так підвищення мікротвердості

може бути зумовлене формуванням дисперсних карбідів, нітридів та інтерметалідів при взаємодії анодів та середовища.

Відштовхуючись від результатів гравіметричного і мікроструктурного аналізів були розраховані критерії формування легованого шару  $\gamma_{\text{лш}}$  (C – Al – Cr – 0,04, C – Cr – Al – 0,18). Щоб виразити вплив властивостей утворених покриттів, розраховано коефіцієнт  $\gamma_{\text{в}}$  (C – Al – Cr – 4,36, C – Cr – Al – 5,28), використовуючи співвідношення значень мікродюрOMETричного аналізу, а саме мікротвердість легованого шару та основи. Функціональний критерій ефективності ЕІЛ ( $\gamma_{\text{ф}}$ ) знайдено з добутку  $\gamma_{\text{в}}$  та  $\gamma_{\text{лш}}$ . Для схеми легування C – Al – Cr він становить 0,18, а для C – Cr – Al – 0,99.

### 3.4 Порівняльна характеристика покриттів

Після порівняння результатів, одержаних при електроіскровому легуванні за схемами Cr – Al – C, Cr – C – Al, Al – Cr – C, Al – C – Cr, C – Al – Cr, C – Cr – Al, були побудовані гістограми.

З рисунку 3.15 видно, що найбільшу товщину шару має покриття утворене в процесі ЕІЛ за схемою Cr – C – Al . Максимальна товщина шару 20 мкм.

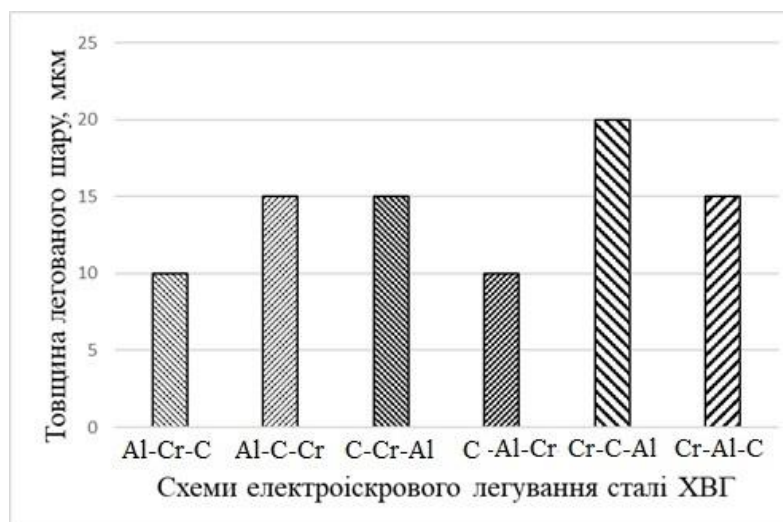


Рисунок 3.15 – Гістограма товщини покриттів в залежності від схем ЕІЛ

Результати гравіметричного аналізу надали можливість визначити кінетику перенесення маси, що відбувається при почерговому нанесенні покриттів. Як видно з гістограми (рис. 3.16), найвищий коефіцієнт масоперенесення зафіксовано для з початковою стадією нанесення хрому. Це можна пов'язати з утворенням твердих розчинів заліза та хрому.

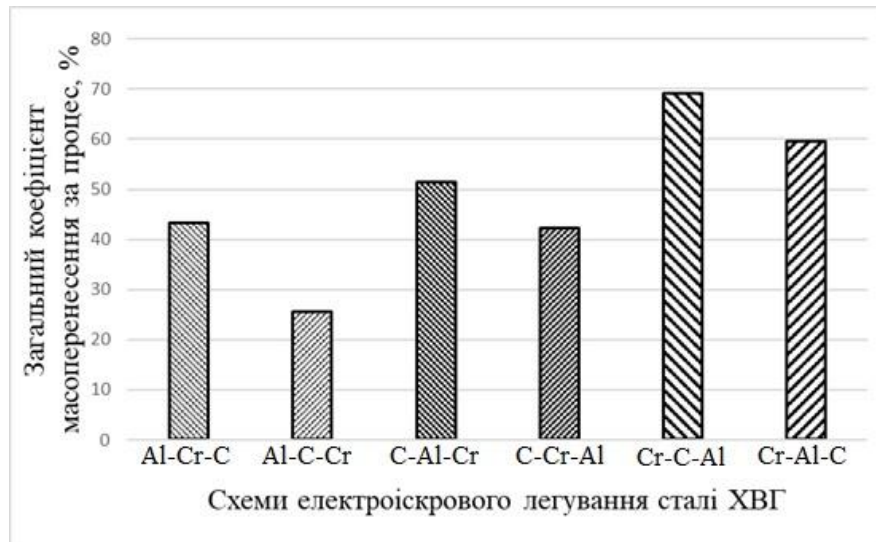


Рисунок 3.16 – Гістограма коефіцієнту масоперенесення в залежності від схем ЕІЛ

Максимальна мікротвердість спостерігається для покриттів, одержаних легуванням за схемою Cr – C – Al (рис. 3.17).

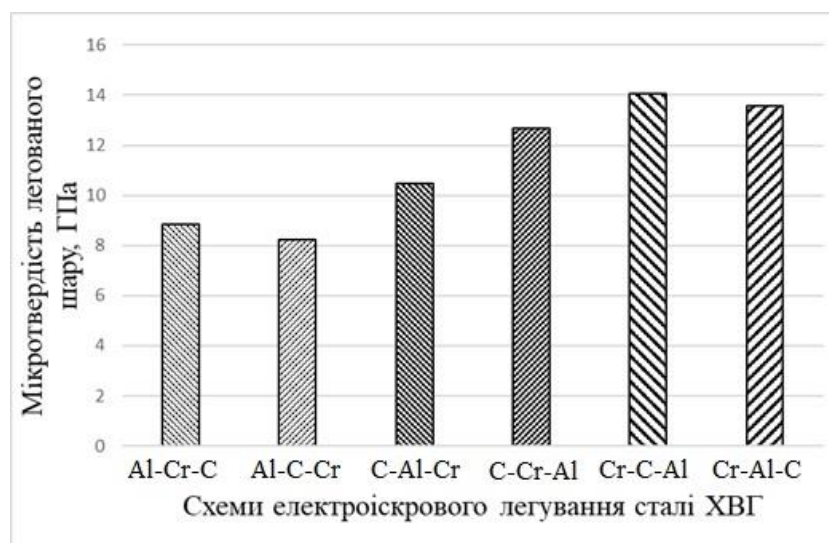


Рисунок 3.17 – Гістограма мікротвердості в залежності від схем ЕІЛ

Збільшення мікротвердості поверхневого шару сталі ХВГ з нанесеннями покриттями, ймовірно, пов'язане з формуванням твердих розчинів на базі матеріалів електродів, інтерметалідних сполук та фаз проникнення, які виникають при взаємодії з елементами міжелектродного середовища (нітриди, оксиди).

За розрахунками функціональних критеріїв ефективності кожного з процесів, який містить в собі параметри формування легованого шару та його властивостей, встановлено найбільше значення для процесу Cr – Al – C (рис. 3.18).

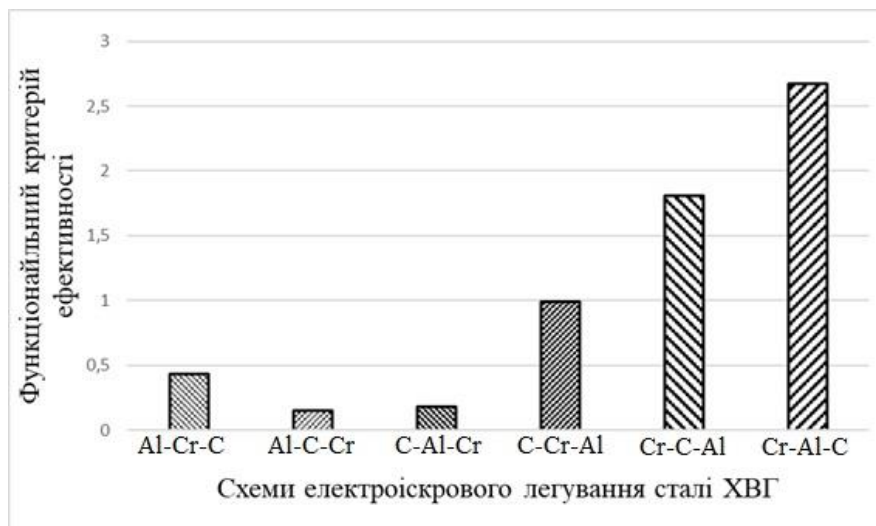


Рисунок 3.18 – Гістограма функціонального критерію ефективності процесу в залежності від схем ЕІЛ

Вочевидь, суттєвий вплив здійснює внесок складової властивостей, тобто найбільше співвідношення між максимальною мікротвердістю покриття та матеріалу основи. А також загальні коефіцієнти масоперенесення за процеси у такі послідовності мають найбільше значення.

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що ЕІЛ сталі ХВГ без захисного середовища призводить до утворення покриттів неоднорідної концентрації.

2. В залежності від послідовності нанесення металів анодів (Cr, Al, C) на сталеву основу змінюється характер розподілу мікротвердості за глибиною шару, а також змінюється її максимальне значення.

3. Зростання поверхневої мікротвердості досліджуваних зразків пов'язано з наявністю твердих розчинів на базі металів легувальних анодів та основи, інтерметалідних сполук, а також карбідних включень. Найбільшу мікротвердість (14,08 ГПа) в порівнянні з вихідною поверхнею має зразок сталі ХВГ після ЕІЛ у послідовності нанесення Cr-C-Al.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ

### 4.1 Актуальність

Метою даного розділу є проведення маркетингового аналізу стартап-проекту, визначення перспектив реалізації та можливостей його ринкового впровадження [40].

Актуальною проблемою, що стоїть перед матеріалознавцями, є розробка нових технологій та удосконалення існуючих методів обробки виробів (деталей машин та інструментів) для подовження їх терміну експлуатації, підвищення фізико-механічних характеристик та зменшення витрат на їх виготовлення.

Для зміцнення і нанесення захисних покриттів досить перспективним є метод ЕІЛ, що дозволяє формувати локальні покриття на будь-яких струмопровідних матеріалах, є простим у реалізації та ресурсозберігаючим.

Дана обробка є ефективною, оскільки дозволяє поліпшити комплекс механічних характеристик робочих поверхонь виробів.

### 4.2 Опис ідеї проекту

В межах підпункту проаналізовано такі аспекти:

- зміст ідеї;
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару;
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Опис ідеї стартап-проекту наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Захисне та відновлювальне електроіскрове легування деталей вимірювальних та ріжучих інструментів	Машинобудівна, оборонна, харчова промисловості	Продуктивність складає від 1 см <sup>2</sup> /хв до 8см <sup>2</sup> /хв; низька вартість; екологічно чистий процес.

Технологічну здійсненність ідеї проекту висвітлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технології
Ерозія (руйнування) матеріалу анода при іскровому розряді	Технологія наявна	Технологія доступна

Аналізуючи дані, що наведені в таблицях, можна зробити висновок, що можливість реалізації проекту існує, оскільки дана технологія наявна на ринку та доступна для реалізації.

#### 4.3 Розрахунок собівартості проведення дослідження

Робота виконувалася на кафедрі фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Планова собівартість визначається за наступними видатковими статтями:

- витрати на основні матеріали;
- витрати на спецобладнання, необхідне для проведення експерименту;
- витрати на заробітну платню персоналу;
- відрахування в соцстрах;
- витрати на службові відрядження;
- витрати на послуги сторонніх організацій;
- інші невраховані прямі витрати по темі;
- накладні витрати.

##### 4.3.1 Витрати на основні матеріали

Визначення витрат на матеріали, які необхідні для проведення експерименту, проводяться виходячи із вартості та необхідної кількості матеріалів [41]. Дані про основні матеріали, які необхідні для проведення експерименту наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість основних матеріалів

Найменування матеріалів	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
1. Чистий Cr (марка Х99)	кг.	0,1	447	44,7
2. Чистий Al (марка АК8)	кг.	0,1	150	15
3. Графіт (марка МПГ-6)	кг.	0,1	140	14
4. Сталь ХВГ	кг.	0,1	140	14
5. Шліфувальний папір	шт.	10	10	100
6. Спирт Етиловий 96%	літр	0.1	200	20
7. Азотна кислота	літр	0,03	17	0,51
В цілому				208,21

Транспортні витрати приймаємо в розмірі 10 % від ринкової вартості:  
 $208,21 \cdot 0,1 = 20,82$  грн.

Повна сума витрат на матеріали:  $208,21 + 20,82 = 229,03$  грн.

#### 4.3.2 Витрати на спеціальне обладнання та прилади

Всі роботи виконуються на вже наявному обладнанні. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання відносяться до накладних витрат.

#### 4.3.3 Зарплата виконавців по темі, основна та додаткова

Витрати за цією статтею складаються з основного та додаткового фонду заробітної плати [42].

Розрахунок витрат основної заробітної платні ведеться на основі даних по трудомісткості виконання окремих етапів дослідження та денної заробітної платні виконавців (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Розрахунок денної заробітної платні виконавців теми

Виконавець	Місячний оклад, грн	Денна ЗП, грн.
Відповідальний виконавець теми, провідний науковий співробітник	10650	484,10



Продовження таблиці 4.4

Виконавець	Місячний оклад, грн	Денна ЗП, грн.
Інженер-дослідник	5750	261,36
Лаборант	4200	190,91

Тривалість різних етапів виконання дослідження наведена в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Трудомісткість різних етапів виконання науково дослідницької роботи

Етапи дослідження	Трудомісткість, людино/день		
	Відповідальний виконавець теми	Інженер-дослідник	Лаборант
1. Постановка задачі та визначення напрямів дослідження	1	2	-
2. Вивчення літератури	-	14	-
3. Розробка методики проведення робіт	5	10	5
4. Підготовка зразків	-	-	8
5. Підготовка обладнання	-	2	5
6. Проведення експериментів	-	12	10
7. Обробка експериментальних результатів	-	25	6
8. Обговорення результатів	4	5	5
9. Оформлення результатів	2	12	6
Разом	12	82	45

Сума прямого та додаткового фондів заробітної платні:  $\text{ПФЗ} + \text{ДФЗП} = 35831,67 + 10749,51 = 46581,17$  грн.

Величина прямого фонду заробітної платні (ПФЗП) визначається як добуток трудомісткості на денну заробітну платню виконавця:  $\text{ПФЗП} = 12 \cdot 484,10 + 82 \cdot 261,36 + 45 \cdot 190,91 = 35831,67$  грн.

Додатковий фонд заробітної платні (ДФЗП) складає 30% від прямого фонду:  $ДФЗП = ПФЗП \cdot 0,3 = 10749,51$  грн.

#### **4.3.4 Відрахування на соціальні заходи**

На сьогоднішній день відрахування на соціальні заходи у відсотках від суми прямого та додаткового фондів заробітної плати, тобто від повного фонду заробітної плати, складають 22% [42].

Таким чином, відрахування на соціальні заходи складуть:  $V_c = (ПФЗП + ДФЗП) \cdot 0,22 = 46581,17 \cdot 0,22 = 10247,86$  грн.

#### **4.3.5 Витрати на службові відрядження**

Згідно з планом даного дослідження службові відрядження не передбачаються.

#### **4.3.6 Витрати на послуги сторонніх організацій**

Згідно з планом даного дослідження послуги сторонніх організацій не передбачаються.

#### **4.3.7 Інші прямі невраховані витрати**

Витрати по цій статті визначаються у розмірі 10% від суми всіх врахованих планових прямих витрат по темі:  $П_n = (46581,17 + 10247,86 + 229,03) \cdot 0,1 = 5705,81$  грн.

#### **4.3.8 Накладні витрати**

До накладних витрат відносять:

- адміністративну заробітну плату - управлінського персоналу, господарського та обслуговуючого персоналу з нарахуванням органам страхування;
- витрати на придбання експериментального обладнання та приладів;

- витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- амортизація приладів, устаткування та установок;
- витрати на воєнізовану охорону;
- інші загальногосподарські та дослідницькі витрати, тощо.

За нормативами для КПП ім. Ігоря Сікорського величина накладних витрат складає 20% від основної заробітної платні персоналу науково дослідної роботи:  $H_v = 35831,67 \cdot 0,20 = 7166,34$  грн.

#### 4.3.9 Планова кошторисна вартість дослідження

Зроблені розрахунки дозволяють визначити загальну планову кошторисну вартість виконання дослідження. Плановий кошторис витрат по темі досліджень наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Планова кошторисна вартість дослідження

Назви калькуляційних статей	Позначення	Сума		Примітки
		грн.	% до загального	
Пряма та додаткова зарплатня персоналу	З <sub>пд</sub>	46581,17	66,61	За розрахунком
Відрахування на соціальні заходи	В <sub>с</sub>	10247,86	14,65	22% від ЗП
Витрати на матеріали	С <sub>м</sub>	229,03	0,33	За розрахунком
Витрати на обладнання	С <sub>об</sub>	-	-	Не планується
Витрати на службові відрядження	С <sub>в</sub>	-	-	Не планується
Роботи та послуги сторонніх організацій	С <sub>і</sub>	-	-	Не планується
Інші невраховані прямі витрати по темі	П <sub>н</sub>	5705,81	8,16	10% від врахованих прямих витрат

Продовження таблиці 4.6

Назви калькуляційних статей	Позначення	Сума		Примітки
		грн.	% до загального	
Накладні витрати	Н <sub>в</sub>	7166,34	10,25	20 % від основної заробітної плати
Разом	З	69930,21	100	-

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей (табл. 4.7), які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 4.7 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	3450
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од.	73500
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Існує ймовірність, що на момент виходу на ринок будуть компанії, які утворюють олігополію. Складно територіально віднайти місце з мінімальною кількістю конкурентів.
5	Вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає

Продовження таблиці 4.7

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	18

Для визначення потенційних груп клієнтів та їх характеристики, формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Зміцнення окремих частин вимірювальних та ріжучих інструментів	Малі та середні підприємства	Висококваліфікований персонал; Швидкість обслуговування; Сучасні технології та техніка; Обслуговування (гарантія на роботу, програма лояльності для постійних клієнтів).	до послуги: якість, швидкість виконання; до компанії постачальника: кваліфікація персоналу.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.9 - 4.10) [42]. Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.9 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкурентні переваги, що ґрунтуються на	Введення обов'язкового ліцензування або	Загроза для виходу на ринок.

Продовження таблиці 4.9

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
нормативно-правових актах	суміжного з ним виду реєстрації на даний вид діяльності.	
Конкурентні переваги структурного плану	Наявність переважної частки інформації про клієнтів, постачальників, рекламну діяльність, інфраструктурних зв'язків та ін.	Ця інформація здобувається досить довго, що на нове підприємство на ринку може вплинути негативно.
Загроза появи нових конкурентів	Нові конкуренти приносять у галузь нові виробничі потужності й прагнуть добути частку ринку збуту, знижуючи тим самим позиційний прибуток.	Через конкуренцію можливе зниження загальної прибутковості в даній галузі. Для збереження конкурентоспроможності необхідні додаткові витрати на рекламу, НДДКР, організацію продаж.
Наявність товарів-замінників	Обмежує ймовірну ринкову ціну нашого підприємства	Вищі ціни змушують покупців звернутися до замінника, що знизить обсяг продажу та виробництва в галузі.

Таблиця 4.10 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Конкурентні переваги, що ґрунтуються на нормативно-правових актах	Пільгові умови для нових підприємств даного виду діяльності.	Швидкий вихід на ринок для ведення підприємницької діяльності.
Розвиток НДДКР	Невеликі підприємства є рушійною силою для створення та впровадження новітніх технологій.	Новітні технології сприяють зменшенню собівартості послуги; збільшенню обсягів продажу; підвищенню якості послуги або створенню нової.

Проведемо детальніший аналіз конкуренції в галузі, застосувавши модель «п'яти сил конкуренції» М. Портера. Оцінимо загальний вплив

конкурентного середовища на діяльність компанії [43]. Для оцінки впливу окремих факторів конкурентного середовища використаємо трибальну шкалу: 1 – слабкий вплив, 2 – помірний вплив, 3 – сильний вплив. А також підрахуємо середнє значення впливу за кожною конкурентною силою (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Оцінка конкурентного середовища діяльності компанії

Конкурентні сили	Фактор	Стан фактору	Оцінка фактору в балах		
			1	2	3
1. Проникнення нових конкурентів	1.1. Рівень вхідного бар'єру	Економія на масштабах збуту			x
		Високий рівень фінансових інвестицій			x
		Низький ступінь диференціації продукції			x
	1.2. Реакція існуючих підприємств на появу нових конкурентів	Консерватизм існуючої системи поставок		x	
		Необхідність залучення постійних покупців			x
		Відсутність активної маркетингової політики		x	
		Низька інноваційна активність управління персоналом	x		
		Слабке використання методів ведення конкурентної боротьби		x	
Середнє значення впливу появи нових конкурентів (I <sub>нк</sub> )			2,13		
2. Поява товарів-замінників	2.1. Вплив товарів - замінників	Перевагу отримує товар з нижчою ціною	x		
		Тенденції до реалізації найдешевшого і менш якісного товару		x	
		Відсутність суттєвих розбіжностей в асортименті товарів основних конкурентів		x	
	2.2.Протизаконна імітація існуючих виробів	Поява великої кількості товарів - замінників, отриманих в результаті дублювання відомих марок	x		
Середнє значення сили впливу товарів-замінників (I <sub>тз</sub> )			1,67		

Продовження таблиці 4.11

Конкурентні сили	Фактор	Стан фактору	Оцінка фактору в балах		
			1	2	3
3. Конкурентна сила покупців	3.1. Вплив на покупців конкурентні позиції підприємства	Високий ступінь організації споживачів	x		
		Великі можливості покупців у виборі товарів- аналогів			x
		Високий ступінь стандартизації продукції			x
		Швидка зміна смаків і вподобань споживачів до товарів підприємства	x		
	3.2. Торговельна сила споживачів	Високий рівень інформованості покупців про товари		x	
		Висока цінова еластичність товару		x	
Середнє значення сили впливу покупців (I <sub>пок</sub> )			2		

Таким чином, ми визначили середні значення впливу появи нових конкурентів, сили впливу товарів-замінників, покупців, постачальників, інтенсивності конкуренції між підприємствами.

Заключним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей [43].

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

	Сильні сторони (S)	Слабкі сторони (W)
	1. Поява нового продукту на ринку. 2. Послуга не потребує попередньої та заключної обробки, що економить час та ресурси. 3. Послуга є дешевшою за наявних на ринку аналогів. 4. Для впровадження послуги необхідно досить мало затрат.	1. Наявність на ринку компаній, які мають своїх покупців/клієнтів і позитивну репутацію. 2. Впровадження нових технологій на ринку.



## Продовження таблиці 4.12

Можливості (O)	S-O	W-O
<p>1. Залучення інвестицій, що будуть сприяти розширенню виробництва.</p> <p>2. Вихід на міжнародні ринки в майбутньому.</p>	<p>1. Достатня кількість інвестицій дозволить постійно вдосконалювати технології та освоювати нові ринки.</p> <p>2. Зменшення витрат на економічну діяльність свідчить про зменшення вартості послуги, що є перевагою при виборі компанії для клієнта, тобто сприятиме збільшенню кількості клієнтів.</p>	<p>1. Залучення інвестицій дасть можливість до подальшого розвитку, що сприятиме збільшенню конкурентоспроможності.</p> <p>2. Збільшення кількості інвестицій дозволить залучити більш кваліфікованих працівників для розробки нової технології на ринку.</p> <p>3. Нові технології дозволять розширити виробництво до міжнародного ринку.</p>
Загрози (T)	S-T	W-T
<p>1. Наявність перешкод для входження на ринок.</p> <p>2. Захоплені сектори ринку іншими компаніями створюють перешкоди для залучення клієнтів.</p>	<p>1. Поява нового продукту на ринку супроводжується перешкодами до вступу на даний ринок.</p> <p>2. Зменшення витрат на економічну діяльність свідчить про збільшення конкурентоспроможності підприємства.</p>	<p>1. Компанії-конкуренти можуть вступати в змову для створення додаткових перешкод для входження на ринок.</p> <p>2. Компанії, які існують на ринку, мають своїх клієнтів, що є недоліком для нової компанії на даному ринку, якій складно буде залучити своїх клієнтів</p>

На основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища складаємо перелік ринкових загроз та ринкових можливостей.

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів і мають певну ймовірність здійснення.

Визначений перелік слабких та сильних характеристик, а також властивостей ідеї потенційної послуги є підґрунтям для формування конкурентоспроможності цієї послуги. Це свідчить про зменшення затрат на створення та реалізацію послуги, зменшення її вартості для клієнта.

#### **4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту**

Підприємство, яке буде впроваджувати досліджуваний вид діяльності, має розглянути ринок приватних осіб. Для визначення обороту грошових коштів, числа покупців і обсягу продажів продукції використовувався метод анкетування. Цей метод аналізу спирається на відповіді анкетованих власників автомобілів. Питання в анкетах дають можливість оцінити кількість покупців досліджуваного виду послуг, темпи зростання кількості покупців і обсягу продажів [44].

Таким чином, вдалося з'ясувати, що даним видом послуги користуються (бажають користуватись) близько 23,7 % опитаних осіб з різним рівнем доходів.

Для успішного виходу на ринок необхідно вжити такі заходи для стимулювання попиту:

- надавати послуги у розстрочку фізичним та юридичним особам;
- накопичувальна карта для постійних клієнтів;
- раз на рік передбачаються знижки на послуги не більше 5 % на честь річниці підприємства тощо.

Необхідно визначитись із базовою стратегією розвитку підприємництва, орієнтуючись на основні характеристики послуги. Дана послуга передбачає менші витрати, порівняно з аналогом, тому необхідно застосувати стратегію спеціалізації. Це доцільно, тому що підприємство може завоювати клієнтів за рахунок диференціації та меншої вартості послуг.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Даний проект не є першопрохідцем на ринку	Для підприємницької діяльності даного виду необхідно відвойовувати клієнтів у конкурентів	Підприємство створить унікальні характеристики, які не будуть копіювати інших	Стратегія спеціалізації

#### 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 4.14 необхідно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Для розроблення маркетингової стратегії необхідно описати три рівні моделі послуги. Послуга передбачає зміцнення окремих вимірювальних та ріжучих інструментів.

Таблиця 4.14 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Зміцнення окремих частин вимірювальних та ріжучих інструментів	Дешевизна, простота, швидкість	Зменшення затрат на підприємницьку діяльність, швидкість виконання робіт

Отримані характеристики: товщина легованого шару (10-25) мкм, висока мікротвердість, збільшена зносостійкість.

До переваг серед конкурентів варто віднести дешевизну послуги, оскільки передбачається, що вона буде коштувати приблизно у (4 – 10) разів менше, порівняно з послугами-замінниками та послугами-аналогами.

Методика нанесення є унікальною, тому для збереження її від копіювання конкурентами, можна її запатентувати.

#### **4.7 Формування системи збуту**

Важливим кроком у проектуванні стартап-проекту є визначення оптимальної системи збуту. У даному випадку варто звернутися як і до власного збуту (без посередників), так і до залученої системи збуту (з посередниками). Також при певних умовах підприємство може звернутися до таких збутових операцій, як кліринг (система безготівкових розрахунків за товари, цінні папери та послуги, що побудована на урахуванні взаємних зобов'язань та вимог) та бартер [44].

При виборі програми збуту варто звернути увагу на те, що цільова аудиторія включає переважно осіб із середнім рівнем доходів. Таким чином, реклама та збут можуть збільшити витрати, які прямо чи опосередковано впливають на вартість послуги, не більше, ніж на 10 %. Зважаючи на вищевказане, каналами збуту можуть бути реклама в Інтернеті (соціальні мережі, дошки безкоштовних оголошень тощо), рекламні листівки, банери та інші відносно недорогі види реклами [44].

#### **4.8 Висновки до розділу 4**

1. Підсумовуючи проаналізовані характеристики послуги, можна сказати, що дана технологія є потенційним претендентом на успіх, оскільки даний метод є унікальним, досить дешевим та не потребує значних часових затрат у реалізації.

2. Аналізуючи ринок, було виявлено, що бар'єрами при входженні на нього можуть виступати: малокваліфіковані працівники, невдале місце розташування підприємства, зменшення попиту на дану послугу та інші. Отже, стартап-проект має переваги над конкурентами, тому має місце до подальшого впровадження та реалізації.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Метою розділу охорони праці є забезпечення належних умов праці в процесі дослідження функціональних покриттів на поверхні сталі ХВГ, які були нанесені багатостадійним електроіскровим легуванням Cr-, Al-, C-анодами, що проводилося на «Елитрон-26А», а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та безпеку в надзвичайних ситуаціях.

Аналізуючи умови праці при виконанні даної НДР потрібно розглянути наступні чинники:

- мікроклімат;
- забруднення повітря робочої зони шкідливими речовинами;
- шум;
- вібрація;
- освітлення;
- електричний струм.

### **5.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві**

Основоположним документом в галузі охорони праці є Закон України «Про охорону праці», який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних державних органів відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні. Інші нормативні акти мають відповідати не тільки Конституції та іншим законам України, але, насамперед, цьому Законові [45].

Відповідно ст. 13 Закону України «Про охорону праці» роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони

праці. З цією метою роботодавець забезпечує функціонування системи управління охороною праці і несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

Згідно ст. 14 Закону України «Про охорону праці» працівник зобов'язаний: дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства; знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту; проходити у встановленому законодавством порядку попередні та періодичні медичні огляди. Працівник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог [45].

Відповідно до ст. 15 Закону України «Про охорону праці» на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб роботодавець створює службу охорони праці відповідно до типового положення, що затверджується центральним органом виконавчої влади з питань нагляду за охороною праці.

Припис спеціаліста з охорони праці може скасувати лише роботодавець. Ліквідація служби охорони праці допускається тільки у разі ліквідації підприємства чи припинення використання найманої праці фізичною особою.

Оскільки в КПІ ім. Ігоря Сікорського працює більше 50 осіб, то відповідно ст. 15 Закону України «Про охорону праці» створюється служба охорони праці, яка підпорядковується безпосередньо ректору КПІ ім. Ігоря Сікорського Згуровському Михайлу Захаровичу. Начальник служби охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського – Луцик Е.Г. На факультеті ІФФ відповідальний за службу охорони праці Лобода П.І., на кафедрі – Мазур В.І. В лабораторії (№ 036-9), де виконувалась робота, відповідальним за охорону праці є к.т.н., доц., Іващенко Є.В.

## 5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

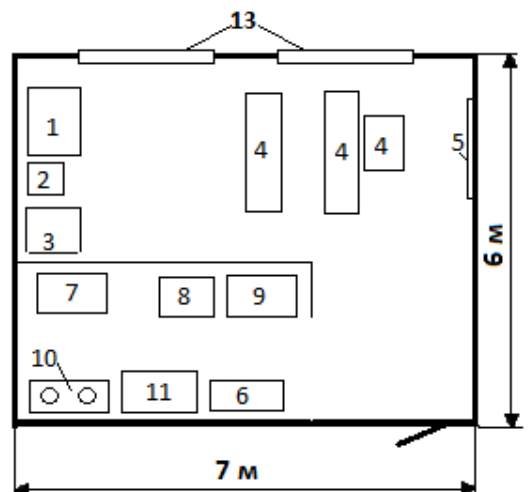
### 5.2.1 Мікроклімат

Для нормальної працездатності людини суттєве значення має чистота повітря, необхідний хімічний склад, оптимальність його (повітря) температури, вологості та швидкості руху. Тому аналіз мікроклімату у лабораторіях має важливе значення. Дослідження мікроклімату звертають увагу на такі показники:

- температура;
- рухливість повітря у робочій зоні;
- вологість повітря.

Отримані дані співставляють з встановленими нормами.

Робота виконувалася на кафедрі фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського в лабораторії електроіскрового легування (ЕІЛ) № 036. Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів представлено на рис. 5.1.



1 – твердомір ПМТ-3, 2 – тумба, 3 – комп’ютер, 4 – робочі столи, 5 – дошка,  
6 – шафа, 7 – стіл для шліфування, 8 – прилад для вимірювання  
зносостійкості, 9 – прилад «Елитрон – 26», 10 – полірувальні круги, 11 – стіл

Рисунок 5.1 – Розташування робочих місць в приміщенні де проводились дослідження

Було проведено вимірювання параметрів приміщення лабораторії та розрахунки площі і об'єму, що припадають на одну особу. Розрахунки наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри науково–дослідної лабораторії

Характеристика	Виміряні дані
Довжина, м	7
Ширина, м	6
Висота, м	3,8
Площа, м <sup>2</sup>	42
Об'єм м <sup>3</sup>	159,6
Площа на одну особу, м <sup>2</sup>	6
Об'єм на одну особу м <sup>3</sup>	42

Згідно зі ДБН В.2.2-28-2010 норма площі на одну особу становить 4,5 м<sup>2</sup>, а норма об'єму приміщення на одну особу – 15 м<sup>3</sup>.

Тобто, лабораторія 036-9, згідно з ДБН В.2.2-28-2010, відповідає нормам.

Для забезпечення оптимального мікроклімату «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальні і допустимі температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт [46].

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 категорія важкості робіт – I б. Ця категорія містить легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год. Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії № 036 показали, що в холодний період року при водяному опаленні фактична температура становить 21 °С (оптимальна – 21 °С – 23 °С, допустима – 17 °С – 25 °С), фактична швидкість руху повітря – 0,1 м/с (оптимальна – 0,1 м/с, допустима – ≤ 0,2 м/с) та фактична відносна вологість – 60 %



(оптимальна – 40 % – 60 %, допустима – 75 %). В теплий період року при природньому повітрообміні фактична температура становить 22 °С (оптимальна – 22 °С – 24 °С, допустима – 19 °С – 30 °С), фактична швидкість руху повітря – 0,2 м/с (оптимальна – 0,2 м/с, допустима – 0,1 м/с – 0,3 м/с) та фактична відносна вологість – 55 % (оптимальна – 40 % – 60 %, допустима – 60 % при 27 °С).

На основі вище написаного можна зробити висновок, що мікроклімат в лабораторії відповідає вимогам санітарних норм.

### **5.2.2 Освітленість**

Освітлення буває трьох видів: суміщене, штучне і природне. Природне у свою чергу поділяється на верхнє, бічне та комбіноване. Штучне – місцеве і загальне [47].

Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад зору; світлові відблиски – тимчасове засліплення.

У лабораторії здійснюється природне бокове освітлення (вікна з північного боку) та штучне загальне. Відстань від вікна до місця основної роботи складає 1 м.

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщенні потрібно проводити очищення скла, віконних рам і світильників не рідше двох разів у рік, а також проводити своєчасну заміну перегорілих ламп.

### **5.2.3 Шум**

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі [48]. Розрізняють шуми:

- механічний (під час роботи конвеєра, виконання завантажувально-розвантажувальних робіт);

- електромагнітний (під час роботи електромагнітних пристроїв змінного струму);
- аеродинамічний (у разі витоку газів, руху повітря у вентиляційних камерах);
- гідродинамічний (під час руху води і різноманітних рідин);
- повітряний (розповсюджується в повітряному середовищі);
- структурний (внаслідок коливання конструкцій стін, перекриттів, перегородок будівлі).

Науково-дослідницька робота виконувалась на установці «Елитрон-26А», що видає певний шум під час роботи, також шум надходив у процесі дослідження зразків на зносостійкість.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСТУ 12.1.003-86. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99 [49].

Засоби та заходи колективного захисту, що зменшують шум на шляху його поширення, поділяються на архітектурно-планувальні та акустичні (рис 5.2).



Рисунок 5.2 - Класифікація засобів та заходів колективного захисту, що зменшують шум на шляху його поширення

Архітектурно-планувальні заходи щодо захисту від шуму передбачаються при проектуванні, реконструкції та експлуатації підприємства (цехів, ділень).

Звукоізоляція є ефективним засобом зменшення рівня шуму у напрямку його поширення, що реалізується шляхом встановлення звукоізоляційних перешкод (перегородок, кабін, кожухів, екранів). Принцип звукоізоляції базується на тому, що більша частина звукової енергії, яка потрапляє на перешкоду, відбивається і лише незначна її частина проходить крізь неї.

Для звукоізоляції окремих шумних ділень у приміщенні чи устаткування застосовують легкі багатошарові звукоізоляційні перегородки з повітряними прошарками. Для звукоізоляції найбільш шумних вузлів та агрегатів (ланцюгові передачі, двигуни, компресори, вентилятори) використовуються звукоізоляційні кожухи, які є засобами, що встановлюються в безпосередній близькості від джерела шуму. В тих випадках, коли неможливо ізолювати шумне устаткування чи його вузли, захист працівника від дії шуму здійснюють шляхом облаштування звукоізолюваної kabіни з пультом керування та оглядовими вікнами [50].

У даному випадку наявний імпульсний шум. Так як робота на установках, які викликають шум, проводилась рідко, тому для захисту від шуму використовували засоби індивідуального захисту – біруші.

#### **5.2.4 Електробезпека**

Відповідно діючим правилам побудови електроустановок ППЕ-97 приміщення лабораторій з точки зору небезпеки ураження людини електричним струмом відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки електротравм [51]. Це сухі приміщення з температурою повітря 18 °C-25 °C та струмо-непровідною підлогою. Електроустановки, що використовуються при виконанні даної НДР, живляться напругою 220 В змінного струму частотою

50 Гц. Причинами враження електричним струмом під час виконання трудового процесу з електрообладнанням є:

- випадковий дотик до струмоведучих частин, які перебувають під напругою, через відсутність засобів недоступності або безвідповідальне відношення до безпеки персоналу;
- дотик до не струмоведучих частин електроприладів, які випадково потрапили під напругу через ушкодження ізоляції чи іншого ушкодження;
- потрапляння під напругу під час проведення ремонтних робіт на відключених електроприладах через помилкове їх включення.

Вплив електричного струму на організм може мати дуже небезпечні для здоров'я людини наслідки і навіть привести до смерті [52]. Імовірність смертельного результату при поразці електричним струмом вище, ніж при інших причинах травматизму.

На дію електричної поразки впливає ряд факторів:

- величина струму (1 мА);
- рід струму (струм перемінний);
- частота струму (50 Гц);
- шлях струму в організмі (г-н, р-р, р-г);
- тривалість дії струму;
- стан організму;
- виробниче середовище, відноситься до 1 класу.

Величина струму, що протікає через яку-небудь ділянку тіла. При розробці захисних заходів, вважають небезпечним струм у 25 мА, при якому важко самостійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного результату.

Заходи, що зменшують ймовірність ураження струмом:

- проведення інструктажів;
- розміщення струмопровідних частин на недоступній для дотику висоті;

- застосування, періодичний контроль і підтримання ізоляції;
- застосування малих напруг, блокувальних пристроїв, чутливих до напруги на корпусі щодо землі схем, розподільних трансформаторів;
- захисне відключення (автоматичне відключення установки у випадку замикання).

У лабораторії вірно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Розташування робочих місць таке, що виключається можливість дотику до корпусів, електроустаткування і приладів.

### 5.2.5 Запиленість та загазованість

В процесі приготування шліфів на механічному верстаті утворюється неорганічний пил з сполукою кремнію та оксиди хрому  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при поліруванні пастою «ДОІ» у мокрому середовищі. ГОСТ 12.1.005-88 передбачає гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин в повітрі робочої зони: пил з діоксидом кремнію до 4 % – ГДК = 4 мг/м<sup>3</sup>, клас 3; для окисла хрому ГДК = 1 мг/м<sup>3</sup>, клас 2. В таблицю 5.2 занесені виміряні та допустимі значення концентрації речовин, що виділяються при приготуванні шліфів.

Таблиця 5.2 – Концентрація речовин при приготуванні шліфів [53]

Речовина	Концентрація речовини, мг/м <sup>3</sup>	
	Виміряна	Допустима за нормами (ГДК)
Пил з діоксидом кремнію до 4%	8	4
Окисел хрому	0,25	1
Спирт етанол	800	1000
Азотна кислота	3	5

Процес приготування шліфів завершується їх травленням. В цій процедурі застосовуються: спирт етанол для обезжирювання та 3 % процентний розчин азотної кислоти в спирті для травлення.

З таблиці 5.2 видно, що фактичні значення концентрації речовини для пилу з діоксидом кремнію до 4 % та окислу хрому перевищують гранично

допустимі концентрації. Враховуючи коротку тривалість шліфування та поліровки, для забезпечення безпечної роботи достатньо використовувати засоби індивідуального захисту – ШБІ «Лепесток 5». Для травників допустимі норми не перевищуються, тому ніяких засобів захисту використовувати не потрібно.

### 5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

#### 5.3.1 Розрахунок вентиляції

Розрахунок об'єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією  $L_M$ , визначають, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку:

$$L_M = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0, \quad (5.1)$$

де  $F_0$  – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача,  $m^2$ ;

$V_0$  – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі,  $m/s$ .

Площу  $F_0$  визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою [54].

При застосуванні електродугових та плазмових технологій значення  $V_0$  знаходять, виходячи з умов забезпечення заданої швидкості повітря  $V_x$  (0,5  $m/s$ ) у зоні електричної дуги на відстані  $X$  (0,45  $m$ ) від центра всмоктуючого отвору:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (X/d)^2, \quad (5.2)$$

де  $d$  – діаметр вентиляційного отвору,  $m$ .

На рис. 5.3 наведено принципову схему місцевої вентиляції необхідної для проведення ЕІЛ.

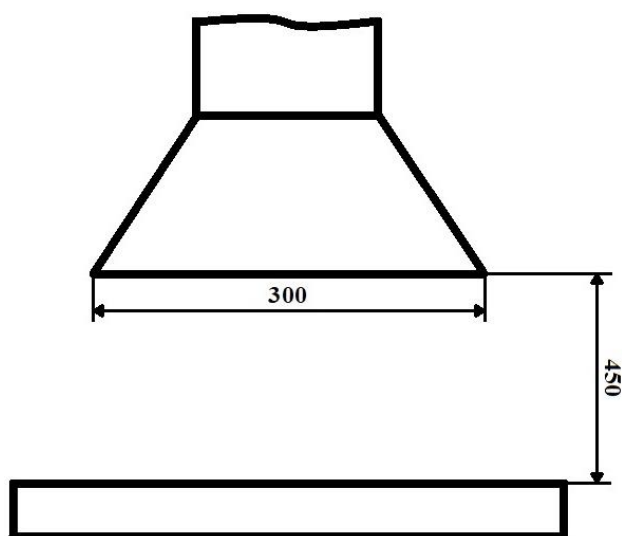


Рисунок 5.3 – Схема місцевої вентиляції

У результаті розрахунків встановлено, що швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі  $V_0$  має становити 18 м/с, а об'єм повітря, що повинно бути видалене місцевою вентиляцією  $L_m$  – 2995 м<sup>3</sup>/год.

#### 5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До видів небезпеки, що можуть статися на виробництві, належать: пожежа; вибух (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); розрив або зруйнування обладнання; викид шкідливих речовин; сполучення перелічених видів небезпеки. З метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій у відповідності до положення [54].

##### 5.4.1 Пожежна безпека

Пожежна безпека об'єкта – стан об'єкта, за яким з регламентованою імовірністю виключається виникнення і розвитку пожежі та впливу на людей

її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків.

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 приміщення лабораторії № 036-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії є негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [55]. Найбільш пожежонебезпечним місцем в лабораторії є місце де прокладена електропроводка. Загоряння в приміщенні може спричинитися через коротке замикання в електропроводці. План евакуації із лабораторії в разі виникнення пожежі наведено на рис. 5.4.

У випадку пожежі на електроустановці, що знаходиться під напругою виникле полум'я не гаситься водою, а використовується вуглекислотний чи вуглекислотноброметиловий вогнегасник.

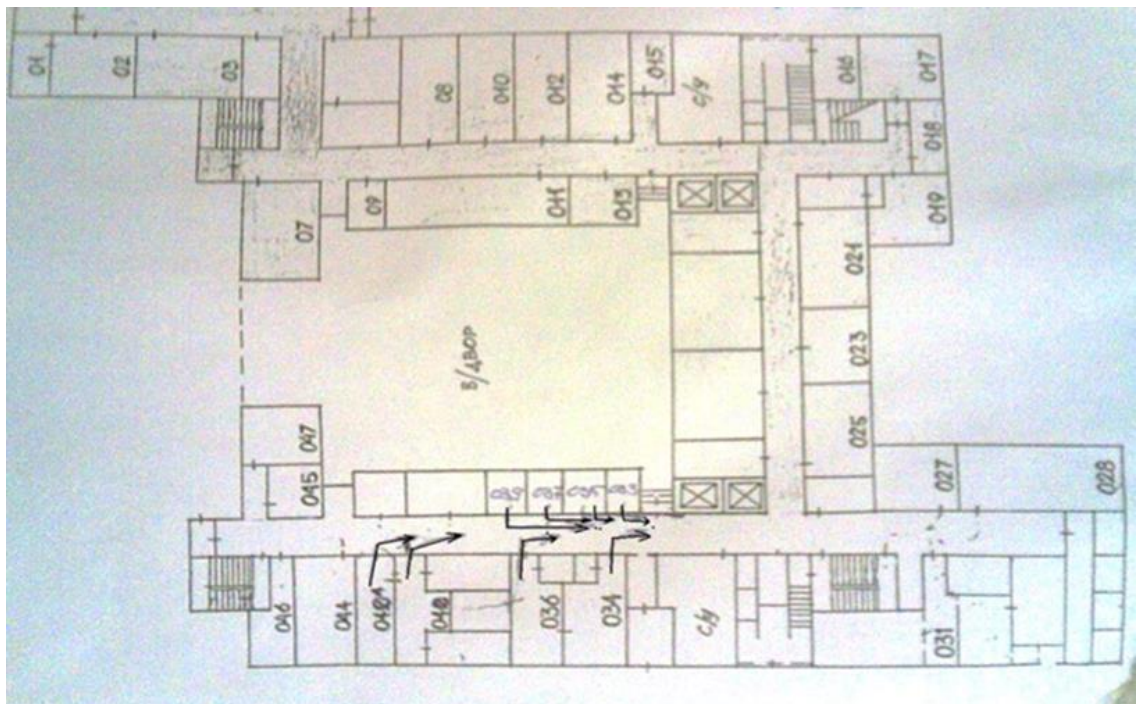


Рисунок 5.4 – План евакуації



На випадок пожежі в лабораторії є водопровід, вогнегасник вуглекислотоброметиловий ОУБ-3 (ДСТУ 111564-65), а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б, пожежні крани. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (оповісник КИ-1).

Відповідно до ОНТП 24-86 лабораторія за пожежною безпекою належить до категорії В, тому що в ній знаходяться тверді та важко горючі матеріали.

У випадку пожежі у лабораторії може горіти:

- електроустановки та їхня проводка;
- паркет та штори;
- шафи та паперові документи, що знаходяться в них.
- виникнення пожеж у лабораторії можливо за наступними

причинами:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електроустаткування;
- необережне звертання з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- неправильне користування устаткуванням.

Для запобігання пожеж необхідно виключити перераховані недоліки і строго дотримуватись правил протипожежної безпеки.

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-91) забезпечується:

- запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту;
- запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин;
- застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПІД та ін.);

- використанням вогнегасників (клас пожежі В): ОХП-10, ОХВП-10, ОВП-7, ОХ-7, ОП-10А; для класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А (вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.03.002-2007).

У випадку пожежі на електроустановці, що знаходиться під напругою виникле полум'я не гаситься водою, а використовується вуглекислотний чи вуглекислотноброметиловий вогнегасник.

#### **5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити електродуговий агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання [55].

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

#### **5.5 Висновки до розділу 5**

1. Було розглянуто основні шкідливі фактори присутні у лабораторіях та місці проведення науково-дослідної роботи. Зважаючи на

основні ДСтУ, ДСН, ДБН, що регулюють необхідні для безпечної роботи параметри, було встановлено, що робоча лабораторія в якій проводилася НДР відповідає всім зазначеним нормам.

2. Отже, на основі вище зазначеного можна зробити висновок, що мікроклімат, організація робочого місця, освітлення в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. А рівень шуму, виробниче та рентгенівське випромінювання не перевищує допустимих норм.

## ВИСНОВКИ

1. В процесі послідовного нанесення хрому, алюмінію та вуглецю на поверхню сталі ХВГ, виявлено можливість формування покриттів товщиною (10-20) мкм з мікротвердістю від 8,24 ГПа до 14,08 ГПа в залежності від порядку нанесення матеріалу аноду під час електроіскрового легування.

2. Максимальна мікротвердість спостерігається для зразків з початковою стадією нанесення хрому (13,56–14,08) ГПа. Збільшення мікротвердості пов'язане з формуванням твердих розчинів на базі матеріалів анодів, інтерметалідних сполук та фаз проникнення, які виникають при взаємодії з елементами міжелектродного середовища.

3. Найбільший функціональний критерій ефективності процесу (1,81–2,67) формування легованого шару, розраховано для процесів легування, в яких першим наносився хром. Вочевидь, суттєвий вплив здійснює внесок складової властивостей, тобто найбільше співвідношення між максимальною мікротвердістю покриття та матеріалу основи.

4. Встановлено, що зносостійкість зразка із сталі ХВГ після ЕІЛ за схемою Cr – Al – C є у 3,6 разів стійкіший до стирання, аніж зразок із сталі ХВГ без ЕІЛ. Це пов'язано із утворення карбідів на основі легувальних матеріалів, які виконують роль твердого мастила.

5. Показано, що розроблений стартап-проект є потенційним претендентом на успіх, оскільки передбачається запровадження унікального методу обробки, що не потребує значних затрат та можливе швидке його впровадження.

6. Встановлено, що НДР виконувалась в лабораторіях, які повністю відповідають вимогам електробезбеки та пожежної безпеки.

## CONCLUSIONS

1. In the process of successive deposition of chromium, aluminum and carbon on the surface of steel HVG, the possibility of forming coatings with a thickness of (10–20) microns with a microhardness from 8.24 GPa to 14.08 GPa, depending on the order of application of the anode material during electrospinning alloying.

2. The maximum microhardness is observed for samples with the initial stage of chromium deposition (13.56–14.08) GPa. The increase in microhardness is related to the formation of solid solutions based on anode materials, intermetallic compounds and penetration phases that occur when interacting with elements of the inter-electrode medium.

3. The highest functional criterion for the efficiency of the process (1.81-2.67) of forming the doped layer is calculated for the doping processes in which chromium was first applied. Obviously, a significant effect is made by the contribution of the component properties, that is, the largest ratio between the maximum microhardness of the coating and the substrate material.

4. It has been found that the wear resistance of a sample of HVG after ESA according to the Cr - Al - C doping plan is 3.6 times more resistant to abrasion than that of a sample of HVG without ESA. This is due to the formation of carbides based on alloys that act as solid lubricants.

5. It is shown that the developed start-up project is a potential contender for success, since it envisages the introduction of a unique method of processing that does not require significant costs and possible its rapid implementation.

6. It has been established that SRW was performed in laboratories that fully meet the requirements of electrical safety and fire safety.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев. – К. : Наукова думка, 1976. – 220 с.
2. Лобачова Г.Г. Особливості формування електроіскрових покриттів на поверхні сталі в процесі пошарового нанесення титану, алюмінію та заліза / Г.Г. Лобачова, Є. В. Іващенко, Д. В. Доронін // Проблеми тертя та зношування. – 2017, – № 4. – С. 77-78.
3. Лазаренко Б.Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – М. : АН СССР, 1959. – 56 с.
4. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко. – М. : Электронная обработка материалов, 1965. – № 1. – С. 49-53.
5. Parkansky N.Y. Development and application of Pulsed-Air-Arc deposition / N.Y. Parkansky // Surf Coat. Techn. – 1993. – Vol 6. – P. 268-273.
6. Бурумкулов Ф.Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин. – С. : типография Красный Октябрь, 2003. – 504 с.
7. Верхотуров А.Д. Электродные материалы для электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров. – М. : Наука, 1988. – 224 с.
8. Лобачова Г.Г. Модельні уявлення про структурно-фазові перетворення у поверхневих шарах сплавів аліза в процесі ЕІЛ карбідо- та нітридоутворюючими елементами у насичувальному міжелектродному середовищі з елементами втілення : автореф. дис. ... к.т.н. / Г.Г. Лобачова. – Київ: НТУУ « КПІ ім. І. Сікорського », 2012. – 20 с.
9. Николенко С.В. Закономерности образования измененного поверхностного слоя при электроискровом легировании / С.В. Николенко, А.Д. Верхотуров, Г.П. Комарова. – М. : Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. – № 4. – С. 28-32.

10. Лазаренко Б.Р. Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов / Б.Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – М. : АН СССР, 1962. – С. 44-51.
11. Мицкевич М.К. Изучение динамики процесса переноса материала электрода в сильноточном импульсном разряде / М.К. Мицкевич, А.И. Бунин, И.А. Бакуто. – М. : Электронная обработка материалов, 1977. – № 4. – С. 18-19.
12. Ribalko A.V. A Modeled ectrospark alloying method for low surface roughness / A.V. Ribalko, O. Sahin, K. Korkmaz // Surface & Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – P. 3509–3515.
13. Афанасьев Н.В. Некоторые особенности электрического разрушения электродов при разрядах в газовой и жидкой средах / Н.В. Афанасьев, С.Н. Капельян, Л.П. Филипов. – М. : Электронная обработка материалов, 1970. – № 1. – С. 3-8.
14. Goldshmit M.I. The constitution of spark-treated metals / M.I. Goldshmit // Iron and Steel. – 1998. – Vol. 24. – P. 469-471.
15. Zeilinski E. Einfub und praktische Anwendung der Legierungselemente bei Stahl und Gubeisen / E. Zeilinski // Technica (Suisse). – 1966. – Bd. 15, No. 6. – S. 538-540.
16. Белый А.В. Поверхностная и упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / А.В. Белый, Е.М. Макушок, И.Л. Поболь. – Минск : «Навука і тэхніка», 1990. – 79 с.
17. Палатник Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий / Л.С. Палатник. – М. : АН СССР, 1953. – № 3. – С. 455-458.
18. Альбински К. Исследование эрозионной устойчивости рабочих электродов при электроискровой и электроимпульсной обработке / К. Альбински. – М. : Станки и инструменты, 1994. – № 7. – С. 11-13.
19. Верхотуров А.Д. Классификация видов электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева. – М. : Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1983. – № 3. – С. 5-7.

20. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электроискровой эрозии в импульсном разряде в жидкой, диэлектрической среде : автореф. дис. ... д.т.н. / Б.Н. Золотых. – Москва : МИЭМ, 1968. – 62 с.
21. Зитка В.Н. Влияние физических свойств электродного материала на перемещение веществ, при коротких сосредоточенных разрядах в диэлектрической среде / В.Н. Зитка. – Ч. : Физический журнал, 1963. – № 3. – С. 94-96.
22. Сафонов И.И. Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования : автореф. дис. ... к.т.н. / И.И. Сафонов. – Киев : ИПМАН УССР, 1970. – 26 с.
23. Самсонов Г.В. Закономерности электроискрового разрушения тугоплавких металлов с углеродом, бором / Г.В. Самсонов, А.Н. Лемешко. – М. : Электронная обработка материалов, 1969. – № 6. – С. 3-6.
24. Золотых Б.Н. К вопросу о механизме электрической эрозии в жидкой диэлектрической среде / Б.Н. Золотых. – М. : Журнал технической физики, 1959. – № 29. – С. 1484–1486.
25. Раховский В.И. К вопросу о механизме разрушения электродов в импульсном разряде в вакууме / В.И. Раховский, А.М. Ягудаев. – М. : Журнал технической физики, 1969. – № 2. – 317 с.
26. Gitlevich A.E. Electric Spark Allowing of Metal Surfaces / A.E. Gitlevich // Kishinev. Stiintsa. – 1985. – Vol. 10. – P. 196–220.
27. Канавина Н.Г. Электронно–микроскопическое изучение структурных изменений при электроэрозии / Н.Г. Канавина, Г.В. Спивак. – М. : АН СССР. Сер. физ., 1951. – № 2. – С. 72-76.
28. Мичурина К.А. Электронно–микроскопическое изучение структурных изменений алюминия при электроэрозии / К.А. Мичурина, И.Н. Прилежаева, Г.В. Спивак. – М. : АН СССР. Сер. физ., 1951. – № 4. – С. 418-423.
29. Морозенко В.Н. Термосиловое действие электрического разряда при электроискровом легировании / В.Н. Морозенко, В.С. Назарец, В.И. Тимошенко. – М. : Электронная обработка материалов, 1973. – № 4. – С. 24-26.



30. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров. – М. : Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1983. – № 1. – С. 3-5.

31. Лобачова Г.Г. Вплив складу міжелектродного середовища на структуру та мікротвердість сплавів заліза при електроіскровому легуванні цирконієм, титаном, хромом / Г.Г. Лобачова, Є.В. Іващенко, Ю.М. Гаврилюк // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 3 (68), част. 1. – С. 86–90.

32. Береснев В.М. Многокомпонентные и многослойные вакуумно-дуговые покрытия для режущего инструмента / В.М. Береснев // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – Вип. 1. – С. 152 – 154.

33. Іващенко Є.В. Вплив хромового аноду на формування поверхневих шарів сплавів Fe-Cr при електроіскровому легуванні / Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, Л.Ф. Яценко // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2010. – Вип. 3. – С. 16-22.

34. Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотуров, И.М Муха. – К.: Техніка, 1982. – 181 с.

35. Стороженко М.С. Підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА електроіскровим легуванням композитами на основі  $TiB_2-SiC$  / М.С. Стороженко // Авиационно-космическая техника и технолония. – 2010. – Вип. 4. – С. 21-23.

36. Авербух Б.А. Оценка качества технологического процесса / Б.А. Авербух // Стандарты и качество. – 1982. – № 10. – С. 30-31.

37. Холявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів / В.В. Холявко, І.А. Владимирський, О.О. Жабинська. – К. : Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.

38. Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М. : Машиностроение, 1993. – 195 с.

39. Іващенко Є.В. Вплив хромового аноду на формування поверхневих шарів сплавів Fe-Cr при електроіскровому легуванні /

Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, Л.Ф. Яценко, В.Ф. Мазанко // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2010. – Вип. 3. – С. 16 – 22.

40. Йохна М.А. Економіка і організація інноваційної діяльності: Навч. посіб. / М.А. Йохна, В.В. Стадник – К. : Видавничий центр «Академія», 2005. – 400 с.

41. Петрович Й.М. Організація виробництва: підр. / Й.М. Петрович, Г.М. Захарчин. – Львів : «Магнолія плюс», 2005. – 400 с.

42. Економіка та організація виробництва: підр. / В.Г. Герасимчук, А.Е. Розенплєнер, В.І. Кривда. – Київ : Знання, 2007. – 678 с.

43. Микитюк П.П. Інноваційна діяльність. Навч. посіб. / П.П. Микитюка, Б.Г. Сеніва. – К. : ЦУЛ., 2009. – 392 с.

44. Герасимчук В.Г. Економіка і організація виробництва: Навч. Посібник / В.Г. Герасимчука, А.Е. Розенплєнер, В.І. Кривда. – К. : Політехніка, 2007. – 167 с.

45. Охорона праці // Юридична енциклопедія : [у 6 т.] / ред. кол. Ю. С. Шемшученко (відп. ред.) [та ін.] — К. : Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 2002. — Т. 4 : Н — П. — 720 с. — ISBN 966-7492-04-4.

46. Техніка безпеки // Юридична енциклопедія : [у 6 т.] / ред. кол. Ю. С. Шемшученко (відп. ред.) [та ін.] — К. : Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 2004. — Т. 6 : Т — Я. — 768 с. — ISBN 966-7492-06-0.

47. Основи охорони праці: Підручник. 2ге видання, доповнене та перероблене / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний [та ін.]; за ред. К.Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К. : Основа, 2006. – 448 с.

48. Строительные нормы и правила. Административные и бытовые здания: ДБН В.2.2-28-2010.

49. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний. – Київ: «Каравела», 2001. – 320 с.

50. Строительные нормы и правила. Административные и бытовые здания: ДБН В.2.2-28-2010.

51. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99.
52. Санитарные правила работы с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения: СП 1960-79.
53. Основи охорони праці / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний [та ін.]; за ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – К. : Основа, 2006. – 448 с.
54. Правила устройства электроустановок: ПУЭ-86.
55. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность: ДСТУ 12.1.009-76.